



Fugttransport i byggematerialer

Lund-Hansen, P; Korsgaard, Vagn

Publication date:
1967

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Lund-Hansen, P., & Korsgaard, V. (1967). *Fugttransport i byggematerialer*. Technical University of Denmark. Byg Rapport No. 015

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE
LABORATORIET FOR VARMEISOLERING

meddelelse nr. 15

P. Lund-Hansen

FUGTTRANSPORT I BYGGEMATERIALER

Transfert d'Humidité dans des
Matériaux de Construction

Moisture Transfer in Building Materials

POLYTEKNISK FORLAG

1967

Meddelelser fra Laboratoriet for Varmeisolering

- nr. 1 Vagn Korsgaard: Laboratoriet for Varmeisolering, 4 s. Særtryk af Ingeniørens Ugeblad 24. juni 1960.
- nr. 2 Vagn Korsgaard: Termisk ækvivalente ydervægge, 8 s. Særtryk af Ingeniøren nr. 11, 1961.
- nr. 3 Vagn Korsgaard: Den principielt rigtige opbygning af en ydervæg, 26 s. Særtryk af Husbygningsteknik 1961, udg. af Teknisk Forlag, København.
- nr. 4 Vagn Korsgaard og Th. Lund Madsen: Solafskærmning af vinduer og måling af solindfaldet gennem forskellige typer varmeisolerende vinduesruder. Udsolgt. Særtryk af Ingeniøren nr. 3, 1962.
- nr. 5 Vagn Korsgaard og Th. Lund Madsen: Registrering af sol- og himmelstråling gennem vinduer. Særtryk af Ingeniøren nr. 9, 1962.
- nr. 6 Vagn Korsgaard, Jørgen S.R. Nielsen og Jens R. Jensen: Krydsvarmeveksleres dynamik og regulering, 174 s. Udgivet sammen med Servolaboratoriet 1962 i kommission hos Akademisk Forlag, København.
- nr. 7 Axel Rubinstein: Metoder til bestemmelse af varmeledningstal, med særlig vægt på teorien for de instationære metoder samt nogle målinger med en termosonde af egen konstruktion, 100 s. Licentiaatafhandling 1963, i kommission hos Akademisk Forlag, København. (Udsolgt.)
- nr. 8 Vagn Korsgaard og Th. Lund Madsen: Isoleringsevnen af nogle typiske ydervægge udsat for det naturlige klima, 77 s. I kommission hos Akademisk Forlag, København. 1964.
- nr. 9 Vagn Korsgaard og Mogens R. Byberg: El-modeller til beregning af flerdimensionale varmestrømme i bygningskonstruktioner. Særtryk af Ingeniøren nr. 6, 1965.
- nr. 10 Vagn Korsgaard og Hans Lund: En passiv elektrisk analogiregnemaskine til rumklimaberegninger. Engelsk, fransk, tysk og italiensk tekst, 57 s. 1965.
- nr. 11 Vagn Korsgaard og Thomas Lund Madsen: A Method of Determining Water Vapour Transmission Through Outer Walls. 4 s. 1965.
- nr. 12 Vagn Korsgaard og Mogens R. Byberg: Driving Rain Tests With Cavity-Filled Brick Walls. 8 s. 1965.
- nr. 13 Erwin Petersen: Solindfald gennem vinduer. 166 s. Licentiaatafhandling 1966, i kommission hos Akademisk Forlag, København.
- nr. 14 Vagn Korsgaard og Th. Lund Madsen: En mannequin til bestemmelse af indendørsklimaets termiske virkninger på mennesket. Særtryk af VVS Nr.9, 1967.

INDHOLDSFORTEGNELSE

| | pag. |
|--|------|
| Forord..... | 5 |
| Symbolliste..... | 7 |
| 1. Indledning..... | 9 |
| 2. Grundlæggende begreber..... | 11 |
| 2.1. Luftfugtighed..... | 11 |
| 2.1.1. Damptrykkurven..... | 11 |
| 2.1.2. Hygrometri..... | 15 |
| 2.2. Porøse materialers fugtindhold..... | 18 |
| 2.2.1. Fugtbindingsenergien..... | 18 |
| 2.2.2. Fugtbindingskræfternes natur..... | 19 |
| 2.2.3. Kapillarpotentialet..... | 21 |
| 2.2.4. Den hygrotermiske ligevægtstilstand..... | 23 |
| 2.2.5. Sorptionskurver..... | 23 |
| 2.2.6. Suktionskurver..... | 31 |
| 2.3. Fugttransport i porøse materialer..... | 35 |
| 2.3.1. Indledning..... | 35 |
| 2.3.2. Vanddampdiffusion..... | 36 |
| 2.3.3. Fugttransport i væskeform (kapillar- sugning)..... | 44 |
| 2.3.4. Andre fugttransportformer..... | 46 |
| 2.3.5. Kombineret damp- og væsketransport..... | 47 |
| 2.3.6. Sammendrag..... | 51 |
| 3. Måling af porøse materialers fugt- transportegenskaber..... | 53 |
| 3.1. Diffusionstallet..... | 53 |
| 3.1.1. Isoterme målinger..... | 54 |
| 3.1.2. Ikke-isoterme målinger..... | 57 |
| 3.2. Kapillarleddningstallet..... | 64 |
| 3.3. Udtørningsforløbet..... | 69 |
| 4. Praktiske beregningsmetoder..... | 71 |
| 4.1. Indledning..... | 71 |
| 4.2. Dampdiffusion i bygningsdele under stationære forhold..... | 72 |
| 4.2.1. Homogen væg uden fugtaflejringsring..... | 72 |
| 4.2.2. Sammensat væg uden fugtaflejringsring..... | 74 |
| 4.2.3. Homogen væg med fugtaflejringsring..... | 75 |

| | pag. |
|---|------|
| 4.2.4. Sammensat væg med fugtaflejring..... | 78 |
| 4.2.5. Beregning af den akkumulerede fugtmængde.. | 78 |
| 4.2.6. Diffusionstal..... | 83 |
| 4.2.7. Terminologi og dimensioner..... | 85 |
| 4.2.8. Beregningsmetodens begrænsninger..... | 86 |
| 4.2.9. Våde materialer..... | 88 |
| 4.3. Klimabetingelser for fugtberegninger..... | 90 |
| 4.3.1. Vinterforhold..... | 90 |
| 4.3.2. Sommerforhold..... | 93 |
| 4.4. Eksempler på fugtberegninger (stationære forhold)..... | 94 |
| 4.5. Fugtdiffusion i ikke-stationære tilfælde.. | 100 |
| 4.5.1. Damptrykkurvens indsvingningsforløb..... | 102 |
| 4.5.2. Byggematerialer som "fugt-stødpuder"..... | 108 |
| 5. Forsøgsarbejde..... | 115 |
| 5.1. Målsætning..... | 115 |
| 5.2. Forsøgsapparaturets opbygning..... | 117 |
| 5.2.1. Princip..... | 117 |
| 5.2.2. Varm kasse..... | 119 |
| 5.2.3. Kold kasse..... | 120 |
| 5.2.4. Temperaturmålinger..... | 124 |
| 5.2.5. Indsætning af prøvelegemer..... | 124 |
| 5.3. Forsøgsplan..... | 127 |
| 5.4. Forsøgenes udførelse..... | 130 |
| 5.5. Forsøgsresultater..... | 132 |
| 5.5.1. Blød træfiberplade..... | 132 |
| 5.5.2. Gasbeton..... | 155 |
| 5.6. Konklusioner af forsøgsresultaterne..... | 176 |
| 6. Appendix: Fugt i flade tage..... | 179 |
| Resumé..... | 193 |
| Litteraturfortegnelse..... | 203 |

FORORD

Varmetransport gennem bygningskonstruktioner vil normalt være ledsaget af fugttransport primært ved diffusion. Ved høje fugtindhold i et byggemateriale vil der også kunne ske en betydelig fugttransport ved kapillarsugning. I praksis vil høje fugtindhold, bortset fra byggefugt, sædvanligvis skyldes kondensation af diffunderende vanddamp og må så vidt muligt undgås, da de kan medføre gener af forskellig art og i det lange løb virke nedbrydende på konstruktionen. Bygningskonstruktioner bør derfor udformes under hensyntagen til nævnte forhold og den projekterende ingeniør må følge- lig have et grundigt kendskab til teorien for fugtvandring og til praktisk brugbare beregningsmetoder. Teorien for den kombinerede fugtvandring ved diffusion og kapillarsugning er endnu langt fra fuldt udbygget, og brugbare beregningsmetoder er ikke udviklet. Ved de lave fugtindhold, som bør tilstræbes i praksis, er det formentlig tilladeligt at betragte fugtvandring som ren diffusion og operere med "tilsyneladende diffusionstal", som under visse omstændigheder indbefatter kapillarsugning.

Teori og beregningsmetoder for fugtvandring i byggematerialer er kun sparsomt behandlet i dansk teknisk litteratur, og vi har derfor ment det berettiget at mangfoldiggøre den foreliggende licentiatafhandling, så den kan købes af bygningsingeniører og andre interesserede. Afhandlingen indeholder en ret udførlig gennemgang af de nyere teorier og beregningsmetoder for fugtvandring i porøse materialer samt originale målinger over diffusionstallets afhængighed af temperatur- og fugtniveau.

Lyngby, i januar 1968

Vagn Korsgaard

Ideen til det foreliggende arbejde stammer først og fremmest fra et ophold ved "Centre Scientifique et Technique du Bâtiment" (C.S.T.B.) i Paris 1964/66, hvor også en del forarbejder blev gjort i form af litteraturstudier, forsøgsvirksomhed samt praktisk behandling af en række problemer. For megen god inspiration under opholdet i Paris er forfatteren Monsieur J.Berthier, Chef de la division "Hygrothermique" tak skyldig.

Arbejdet er udført som licentiatarbejde på Laboratoriet for Varmeisolering med professor, civilingeniør Vagn Korsgaard som faglærer. For interesse, hjælp og støtte bringer forfatteren professor Korsgaard og samtlige medarbejdere sin tak.

P.Lund-Hansen

AVANT-PROPOS

L'idée de l'étude présente se date d'un stage au "Centre Scientifique et Technique du Bâtiment" (C.S.T.B.) à Paris 1964/66 où meme quelques travaux préliminaires tels qu'études documentaires, essais etc. ont été faits. L'auteur doit à Monsieur J.Berthier, Chef de la division "Hygrothermique" beaucoup d'inspiration pendant le stage à Paris.

L'étude a été faite au Laboratoire d'Isolation Thermique de l'École Polytechnique de Danemark sous Monsieur le Professeur V.Korsgaard.

Anvendte symboler og enheder

| | |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| c [g/m^3] | koncentration |
| d [$g/mhmmHg$] | diffusionstal, damppermeabilitet |
| d' [m^2/h] | diffusionskoefficient |
| D [m^2/h] | - " - for vanddamp i luft |
| e [m] | materialetykkelse |
| f [g/m^3] | absolut fugtighed |
| g [g/m^2h] | fugtstrøm |
| h [cm el. m] | kapillarpotentiale |
| k [m^2/h] | fugtledningstal |
| m [g el. kg] | masse |
| p [$mmHg$] | partialtryk |
| p_s [$mmHg$] | vanddamps mætningstryk |
| B [$mmHg$] | barometerstand, totaltryk |
| H [$kcal/m^2h$] | varmestrøm |
| R_d [$47,1$ $mkp/kg^\circ K$] | gaskonstanten for vanddamp |
| s [kp/cm^2] | suction |
| t [h] | tid |
| θ [$^\circ K$] | absolut temperatur |
| u [$\%$ el. g/kg] | fugtindhold (oftest vægt %) |
| V [m^3] | volumen |
| $W=e/d$ [m^2hmmHg/g] | diffusionsmodstandstal |
| x [m] | længde, abscisse |
| z [m] | lodret ordinat |
| δ [$1/deg$] | temperaturgradientfaktor |
| η [$kg h/m^2$] | vands viskositet |
| ϑ [$^\circ C$] | temperatur |
| κ [m/h] | kapillar ledningsevne |
| λ [$kcal/mh deg$] | varmeledningstal |
| μ [$-$] | diffusionsmodstandsfaktor |
| ξ_o [g/kg] | specifik fugtkapacitet |
| ρ [kg/m^3] | masse pr. rumfangsenhed |
| ρ_v [kg/m] | " " " for vand |
| σ [kg/m] | vands overfladespænding |
| φ [$\%$ RF] | relativ luftfugtighed |
| Φ [m] | potentiale |

Symboles et unités employées

| | | |
|----------------|--------------------------|---|
| c | [g/m ³] | concentration |
| d | [g/mhmmHg] | perméabilité à la vapeur |
| d' | [m ² /h] | coefficient de diffusion |
| D | [m ² /h] | " " " (vapeur d'eau dans l'air) |
| e | [m] | épaisseur |
| f | [g/m ³] | humidité absolue |
| g | [g/m ² h] | intensité de la migration d'humidité |
| h | [cm, m] | potentiel capillaire |
| k | [m ² /h] | diffusivité d'humidité |
| m | [g, kg] | masse |
| p | [mmHg] | pression partielle |
| p _s | [mmHg] | pression de saturation |
| B | [mmHg] | pression totale |
| H | [kcal/m ² h] | flux de chaleur |
| R _d | [47,1 mkp/kg°K] | constante de gaz de vapeur d'eau |
| s | [kp/cm ²] | succion |
| t | [h] | temps |
| θ | [°K] | température absolue |
| u | [%, g/kg] | taux d'humidité (le plus fréquent: % en poids = vægt %) |
| V | [m ³] | volume |
| W=e/d | [m ² hmmHg/g] | résistance à la diffusion |
| x | [m] | longueur (abscisse) |
| z | [m] | ordonnée verticale |
| δ | [1/deg] | facteur de gradient en température |
| η | [kgh/m ²] | viscosité de l'eau |
| θ | [°C] | température |
| κ | [m/h] | conductivité capillaire |
| λ | [kcal/mh deg] | conductivité thermique |
| μ | [-] | facteur de résistance à la diffusion |
| ξ _o | [g/kg] | capacité spécifique d'humidité |
| ρ | [kg/m ³] | masse volumique |
| ρ _v | [kg/m ³] | " " pour l'eau |
| σ | [kg/m] | tension superficielle de l'eau |
| φ | [% RF] | humidité relative de l'air |
| Φ | [m] | potentiel |

1. INDLEDNING

Fugttransport i byggematerialer er et emne, der gennem de senere år har beskæftiget byggeforskerne i mange lande.

Årsagen til denne interesse ligger lige for, nemlig hyppigt forekommende fugtskader af forskellig art. Eksempelvis kan nævnes de flade tage, der nu i et par årtier eller mere har voldt svære hovedbrud, men også mange andre eksempler kan nævnes på bygningsdele, oftest af mere eller mindre utraditionel udformning, der har svigtet p.gr. fugtproblemer: gulve på jord (terrændæk), curtain-walls o.lign.

I denne forbindelse bør også nævnes kølehuse, hvor fugtproblemet ofte fremtræder særlig markant p.gr. af de store temperaturdifferenser: svære isdannelser i væg- og tagkonstruktioner. Samtidig er problemerne dog her som regel temmelig overskuelige, idet temperaturpåvirkningen er ensidig og temmelig konstant, i modsætning til den stærkt differentierede klimapåvirkning en bygning normalt udsættes for.

Denne rapport skal dels - ud fra fugtforskningens nuværende stade - redegøre for de faktorer og fysiske fænomener, der dirigerer - eller må formodes at dirigere - fugtbevægelsen i byggematerialer; dernæst forelægges en simpel beregningsmetode for fugttransporten, der - når visse forudsætninger er opfyldt - synes at give anvendelige resultater. Endelig redegøres for forfatterens eksperimentelle arbejder, hvor man har søgt bestemt indflydelsen af temperaturgradient, temperaturniveau og relativ luftfugtighed på nogle byggematerialers vanddampermeabilitet eller diffusionstal, en størrelse, der pr. definition implicerer, at fugttransporten alene afhænger af vanddampenes partialtryk. Dette er, som det vil fremgå - en grov tilnærmelse, der dog er på sin plads ud fra den betragtning, at den fugttransport, der her

undersøges, altid starter fra dampfasen (luftens fugtighed). Det har endvidere været afgørende at udtrykke forsøgsresultaterne på en sådan form, at de direkte kan anvendes i forbindelse med ovennævnte, simple beregningsmetoder.

Det må således understreges, at de målte størrelser angives i enheder, der kun ufuldstændigt beskriver fugttransportfænomenerne. Kapillartransporten indgår således implicit i de målte, tilsyneladende diffusionstal.

2. GRUNDLÆGGENDE BEGREBER

2.1. Luftfugtighed

2.1.1. Damptrykkkurven

På grund af molekylarbevægelsen findes umiddelbart over en is- eller vandoverflade et lag vanddamp. Under ligevægtsforhold er vanddampen mættet; overfladen optager og afgiver lige mange vandmolekyler pr. tidsenhed.

Vanddampens ligevægtstryk, svarende til vandets overfladespænding ved de givne forhold, kaldes mætningstrykket, p_s . Da molekylarbevægelsen tiltager med stigende temperatur, vokser også p_s . Damptrykkkurven angiver temperaturafhængigheden (se fig. 1). Mætningstrykket afhænger alene af temperaturen; atmosfæretryk eller tilstedeværelsen af andre luftarter øver således ingen indflydelse.

Det bemærkes (se fig. 1), at mætningstrykket over is er mindre end over vand (underafkølet) ved den samme temperatur.

I intervaller omkring 0°C kan kurverne med god tilnærmelse angives ved følgende formler:

$$0^\circ \leq \vartheta < 20^\circ\text{C} : p_s = 0,001 \frac{\vartheta^3}{3} + 0,017 \frac{\vartheta^2}{2} + 0,343\vartheta + 4,58 \text{ [mm Hg]}$$

$$-20^\circ < \vartheta \leq 0^\circ\text{C} : p_s = 0,001 \frac{\vartheta^3}{2 \cdot 3} + 0,025 \frac{\vartheta^2}{2} + 0,374\vartheta + 4,58 \text{ [mm Hg]}$$

Damptrykket angives oftest i mmHg (torr) eller mmH_2O (kg/m^2). Efter indførelsen af det internationale enhedssystem, hvor trykenheden er N/m^2 eller de heraf afledede, bør formentlig enheden mbar anvendes.

I tabel 1 er angivet vands mætningstryk for temperaturintervallet $-25 - 75^\circ\text{C}$ med enheden mmHg, der her overalt vil være den benyttede. Omregningsfaktorer til henh. kp/m^2 og mbar fremgår af tabel 2.

Fugtmettet luft indeholder en ganske bestemt mængde vanddamp, større jo højere temperaturen er. I tabel 1 er tillige angivet det maksimale vanddampindhold i g/m^3 .

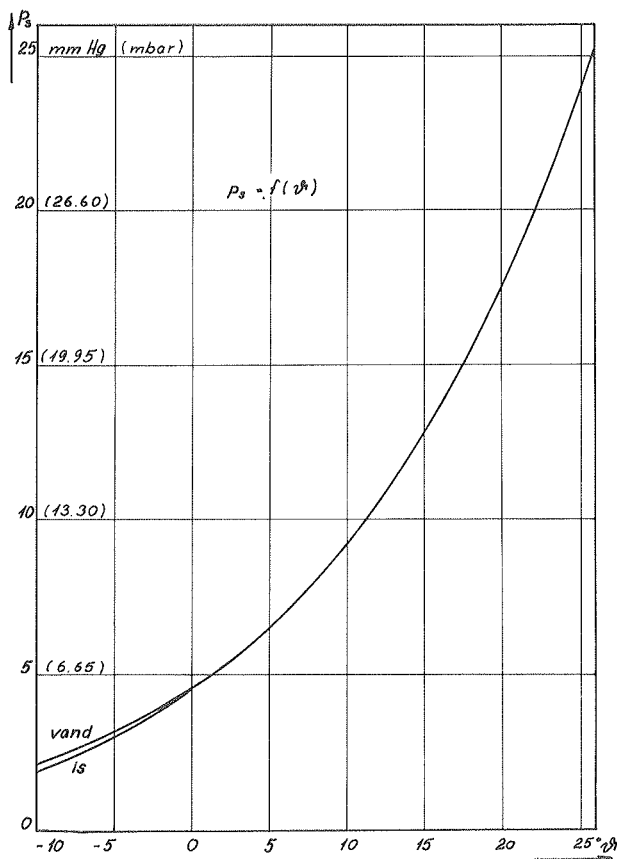


Fig. 1. Vands damptrykcurve.

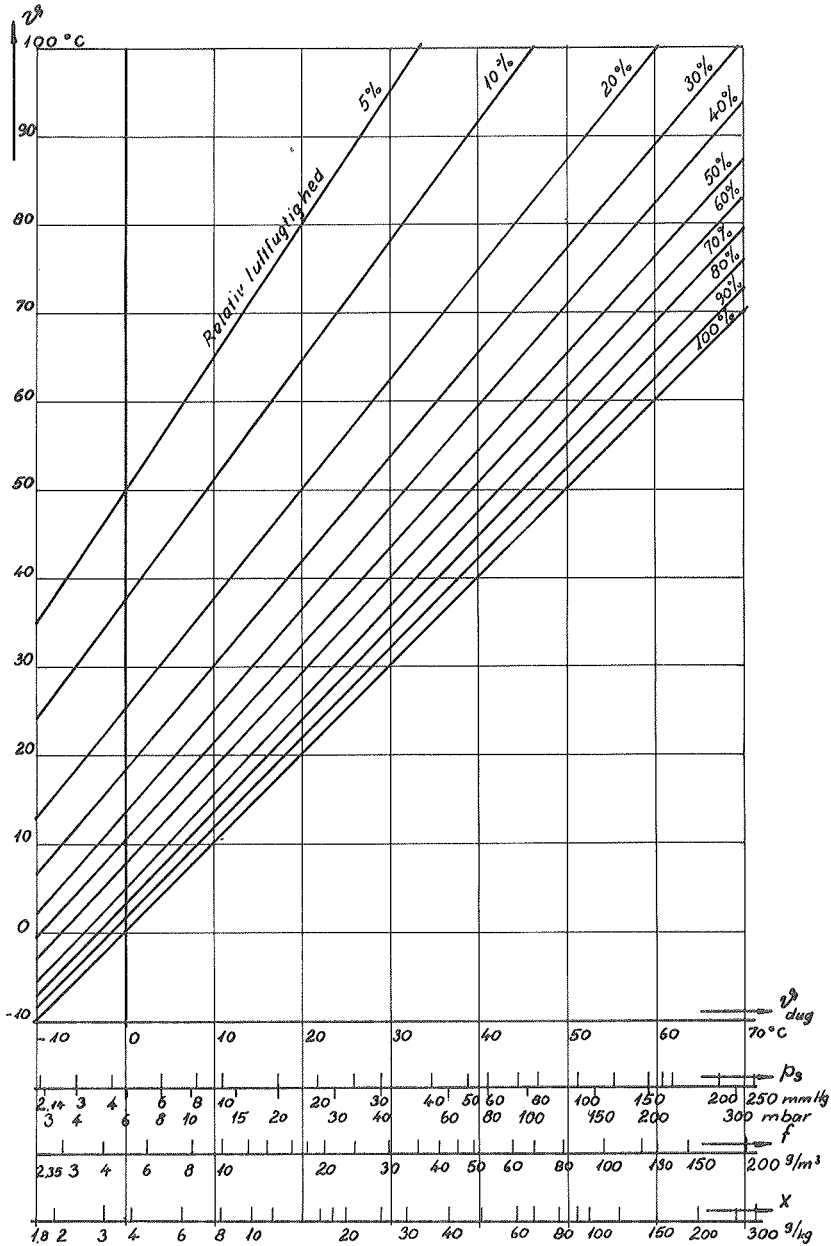
Pressions de vapeur d'eau saturée.

Saturated water vapour pressure.

Fig. 2 (modstående side). Sammenhæng mellem ϑ , ϑ_{dug} , f og x .
(Efter LÜCK [29]).

Relations entre température de l'air, point de rosée, pression saturée, humidité relative et absolue.

Relationship between air temperature, dew-point temperature, saturation pressure, relative and absolute humidity.



Tabel 1: Mætningstryk og maksimalt vandindhold
for vanddamp

| °C | mmHg | g/m ³ | °C | mmHg | g/m ³ |
|-----|-------|------------------|----|-------|------------------|
| -25 | 0,47 | 0,55 | 25 | 23,76 | 23,04 |
| -24 | 0,52 | 0,61 | 26 | 25,21 | 24,40 |
| -23 | 0,58 | 0,67 | 27 | 26,74 | 25,80 |
| -22 | 0,64 | 0,73 | 28 | 28,35 | 27,24 |
| -21 | 0,70 | 0,80 | 29 | 30,04 | 28,78 |
| -20 | 0,77 | 0,88 | 30 | 31,82 | 30,36 |
| -19 | 0,85 | 0,97 | 31 | 33,70 | 32,08 |
| -18 | 0,94 | 1,06 | 32 | 35,66 | 33,84 |
| -17 | 1,03 | 1,16 | 33 | 37,73 | 35,65 |
| -16 | 1,13 | 1,27 | 34 | 39,90 | 37,58 |
| -15 | 1,24 | 1,39 | 35 | 42,18 | 39,60 |
| -14 | 1,36 | 1,52 | 36 | 44,56 | 41,71 |
| -13 | 1,49 | 1,66 | 37 | 47,07 | 43,91 |
| -12 | 1,63 | 1,81 | 38 | 49,69 | 46,21 |
| -11 | 1,78 | 1,97 | 39 | 52,44 | 48,61 |
| -10 | 1,95 | 2,14 | 40 | 55,32 | 51,14 |
| -9 | 2,13 | 2,33 | 41 | 58,34 | 53,73 |
| -8 | 2,32 | 2,53 | 42 | 61,50 | 56,46 |
| -7 | 2,53 | 2,75 | 43 | 64,80 | 59,36 |
| -6 | 2,76 | 2,99 | 44 | 68,26 | 62,32 |
| -5 | 3,01 | 3,24 | 45 | 71,88 | 65,44 |
| -4 | 3,28 | 3,52 | 46 | 75,65 | 68,69 |
| -3 | 3,57 | 3,82 | 47 | 79,60 | 72,04 |
| -2 | 3,88 | 4,13 | 48 | 83,71 | 75,51 |
| -1 | 4,22 | 4,48 | 49 | 88,02 | 79,13 |
| 0 | 4,58 | 4,84 | 50 | 95,51 | 82,98 |
| 1 | 4,93 | 5,20 | 51 | 97,2 | |
| 2 | 5,29 | 5,27 | 52 | 102,1 | |
| 3 | 5,69 | 5,96 | 53 | 107,2 | |
| 4 | 6,10 | 6,37 | 54 | 112,5 | |
| 5 | 6,54 | 6,80 | 55 | 118,0 | 104,3 |
| 6 | 7,01 | 7,27 | 56 | 123,8 | |
| 7 | 7,51 | 7,76 | 57 | 129,8 | |
| 8 | 8,05 | 8,28 | 58 | 136,1 | |
| 9 | 8,61 | 8,83 | 59 | 142,6 | |
| 10 | 9,21 | 9,40 | 60 | 149,4 | 130,2 |
| 11 | 9,84 | 10,03 | 61 | 156,4 | |
| 12 | 10,52 | 10,68 | 62 | 163,8 | |
| 13 | 11,23 | 11,37 | 63 | 171,4 | |
| 14 | 11,99 | 12,09 | 64 | 179,3 | |
| 15 | 12,79 | 12,82 | 65 | 18,75 | 161,1 |
| 16 | 13,63 | 13,65 | 66 | 196,1 | |
| 17 | 14,53 | 14,50 | 67 | 205,0 | |
| 18 | 15,48 | 15,40 | 68 | 214,2 | |
| 19 | 16,48 | 16,33 | 69 | 223,7 | |
| 20 | 17,54 | 17,29 | 70 | 233,7 | 198,1 |
| 21 | 18,65 | 18,35 | 71 | 243,9 | |
| 22 | 19,83 | 19,45 | 72 | 254,6 | |
| 23 | 21,07 | 20,60 | 73 | 265,7 | |
| 24 | 22,38 | 21,80 | 74 | 277,2 | |

Tabel 2: Trykenheder

| Trykenhed | mmHg | mmVS(kg/m ²) | N/m ² | mbar |
|-----------------------------|-----------------------|--------------------------|------------------|-----------------------|
| 1 mmHg (0°C) | 1 | 13,6 | 133 | 1,33 |
| 1 mmVS (kg/m ²) | $7,36 \times 10^{-2}$ | 1 | 9,81 | $98,1 \times 10^{-3}$ |
| 1 N/m ² | $7,50 \times 10^{-3}$ | 0,102 | 1 | 10×10^{-3} |
| 1 mbar | 0,750 | 10,2 | 100 | 1 |

2.1.2. Hygrometri

Fugtig luft indeholdende mindre vanddamp end den til mætning svarende mængde kaldes umættet. Vanddampen yder i vand-luft-blandingen partialtrykket p_v , der er lig det tryk, den samme mængde vanddamp ville yde, såfremt man lod det fordampe i vakuum.

Iflg. Dalton's lov er totaltrykket lig summen af partialtrykkene af de tilsvarende gasarter.

Der gælder altså:

$$B = p_1 + p_v,$$

hvor B er barometerstanden (eller totallufttrykket) og p_1 den tørre lufts partialtryk.

En række begreber benyttes til at kendetegne vanddamp-luft-blandingen. Vi skal nedenfor omtale de vigtigste, idet dog hovedvægten lægges på dem, der vil blive benyttet i de følgende afsnit.

Ved den absolutte luftfugtighed (f.eks. i g/m³) forstås den vægtmængde vand, som en rumfangsenhed fugtig luft indeholder:

$$f = \frac{m}{V}.$$

Den absolutte fugtighed er opadtil begrænset (jvf. afsn.2.1.1), idet vand i væskeform jo udskilles, når mætning indtræder.

Afkøles luft af en given fugtighed, vil mætning indtræde på et givet tidspunkt. Den temperatur, ved hvilken mætning net-

op indtræder, kaldes luftens dugpunkt, ϑ_{dug} . Ved sammenligning med det foregående afsnit ses det umiddelbart, at luftens dugpunkt er et mål for den absolutte fugtighed.

Forholdet mellem den absolutte fugtighed, f , og den samme størrelse ved mætning, f_s (og samme temperatur) kaldes luftens relative fugtighed (R.F.):

$$\varphi = f/f_s \quad [\% \text{ RF}]$$

Ved hjælp af luftarternes tilstandsligning, der gælder temmelig nøje for vanddamp ved ikke for store tryk, indses, at den relative fugtighed ligeledes kan udtrykkes som forholdet mellem partialtrykket og det til den givne temperatur svarende mætningstryk:

$$pV = mR_d\theta; \quad f = \frac{m}{V} = \frac{p}{R_d\theta},$$

hvoraf

$$\varphi = f/f_s = p/p_s$$

Regnes tryk i kp/m^2 , volumen i m^3 og masse i kg , er gaskonstanten for vand $R = 47,07 \text{ [mkp/kg } ^\circ\text{K]}$.

For $\theta = 289^\circ\text{K}$, altså svarende til 16°C , gælder:

$$R_d\theta = 47,07 \cdot 289 = 13,6 \cdot 10^3.$$

Heraf ses, at måles gastryk i mmHg og masse i g , får tilstandsligningen følgende simple udseende:

$$pV = mR_d\theta = m \frac{\theta}{289},$$

hvoraf udledes følgende formel for sammenhængen mellem tryk og absolut fugtighed:

$$p = f \frac{\theta}{289},$$

gældende for mættet såvel som for umættet luft.

Vi skal sluttelig nævne luftens fugtighedsgrad

$$x = \frac{\text{vægtmæd. vand}}{\text{vægtmæd. luft}},$$

der spiller en vigtig rolle for klimateknikeren, idet denne størrelse indgår i Mollier-diagrammet eller i - x -diagrammet, der udtrykker luftens varmeindhold i [kcal/kg tør luft] i afhængighed af fugtighedsgraden.

I modsætning til de øvrige nævnte størrelser afhænger x af totaltrykket = barometerstanden B .

En af størrelserne p_v , f , ϑ_{dug} , φ eller x samt lufttemperaturen ϑ karakteriserer - som det fremgår af det foregående - lufttilstanden fuldstændigt.

Sammenhængen angives ofte i diagramform. Mollier-diagrammet er nævnt; et simpelt og særdeles overskueligt diagram gengives i fig. 2 efter LÜCK. [29].

2.2. Porøse materials fugtindhold

2.2.1. Fugtbindingsenergien

Til et materiales fugtindhold knytter sig en vis fugtbindingsenergi på grund af sammenhængskræfterne mellem den faste masse og de bundne vandmolekyler. Ved udtørring af materialet må denne energimængde tilføres. Omvendt vil ved befugtning en vis varmemængde afgives.

Bindingskræfterne er modsat rettet damptrykket over de bundne vandpartikler og nedsætter dette; over et fugtigt (men ikke gennemfugtet) materiale er vanddampen altså ikke mættet.

Et udtryk for vanddamptrykkenes afhængighed af fugtbindingskræfterne i materialet fås ved følgende termodynamiske betragtning:

Betegner P de ydre tryk (bindingskræfter) og p vanddamptrykkene, V_v og V_d endvidere specifikt volumen for henholdsvis væskeformen og dampformen, gælder under isoterme betingelser:

$$V_d dp = V_v dP$$

Indføres heri massen pr. rumfangsenhed $\rho_v = 1/V_v$ og antages luftarternes tilstandsligning at gælde for dampformen, fås heraf:

$$\frac{R_d \theta}{p} dp = \frac{1}{\rho_v} dP$$

eller

$$\frac{dp}{p} = d \ln p = \frac{dP}{\rho_v R_d \theta}$$

Uden for materialet gælder betingelserne: $P = 0$ og $p = p_s$, hvorfor integration altså giver:

$$P = \frac{-R_d \theta \rho_v \ln p / p_s}{\quad} = \frac{-R_d \theta \rho_v \ln \varphi}{\quad} \quad (\text{Kelvin-ligningen}),$$

der angiver sammenhængen mellem fugtbindingskraften P og det partielle damptryk (eller den relative fugtighed) inde i materialet.

Udsættes materialet for en ydre fugtpåvirkning, vil der indstille sig et ligevægtsfugtindhold, hvis tilsvarende bindingskraft ækvivalerer den ved Kelvin-ligningen udtrykte.

Svarende til stigende bindingskraft kan for fugtindholdet i porøse materialer skelnes mellem en række zoner, omend grænserne selvfølgelig er udflydende:

- 1) Mætning. Samtlige porer er vandfyldte; fugt i dampform findes ikke.
- 2) "Halvmætning". Fugten findes i damp- såvel som i væskeform; væsken forefindes i lange, ubrudte kanaler.
- 3) Hygroskopiske område. Fugten findes i damp- såvel som i væskeform; denne sidste dog kun i små, adskilte porer.

Mætning vil yderst sjældent forekomme i byggematerialer; i det følgende betragtes derfor kun tilfældene 2) og 3) - og hovedsageligt det hygroskopiske område, repræsenterende de ligevægtsfugtindhold, der forekommer ved luftfugtigheder i intervallet $0 < \varphi < \text{ca. } 95 \% \text{ RF}$.

2.2.2. Fugtbindingskræfternes natur

Fugtbindingskræfterne udgøres af:

- 1) osmotiske kræfter, der skyldes tilstedeværelsen af salte i vandet,
- 2) adsorptionskræfter, også kaldet van der Waals-kræfter,
- 3) kapillarkræfter.

ad 1) I saltopløsninger, hvor de opløste partikler bevirker et osmotisk tryk, vil dette være modsat rettet vanddamptrykket og altså nedsætte dette. Partialtrykket over saltopløsninger er lavere end (mætnings)trykket over rent vand.

Det osmotiske tryk er tilnærmelsesvis proportionalt med antallet af opløste partikler. Fig. 3 viser de relative luftfugtigheder over en række mættede opløsninger ved forskellige temperaturer.

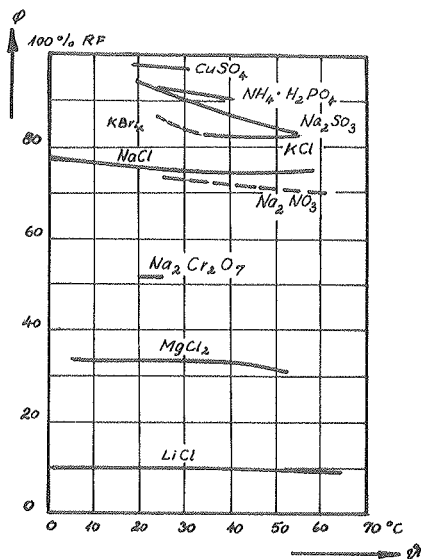


Fig. 3. Relativ luftfugtighed over nogle mættede saltopløsninger. (After LUCK [29]).

Humidité relative au dessus de quelques solutions saturées.

Relative humidity above some saturated salt solutions.

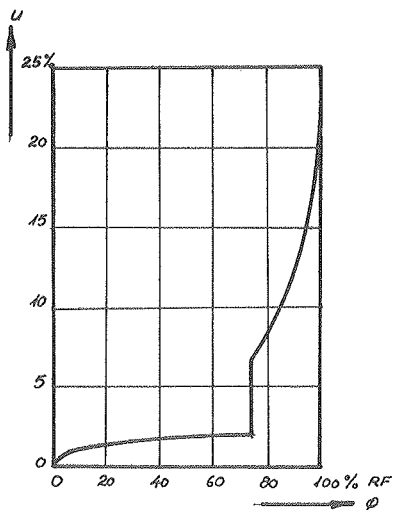


Fig. 4. Sorptionskurve (skematisk) for et saltholdigt materiale (jvf. afsnit 2.2.5).

La courbe de sorption d'un matériau contenant un sel (schématique).

Moisture sorption of a material containing a salt.

Indeholder materialets porer derfor afsatte salte, vil fugtindholdet stige, indtil den fremkomne saltopløsning er så fortyndet, at partialtrykket er lig luftens.

Fænomenet gør sig gældende i egne, hvor luften er saltholdig (se fig. 4); i det følgende vil vi imidlertid overalt se bort fra eventuelle osmotiske virkninger.

ad 2) Adsorptionslagets tykkelse er af størrelsesorden nogle få molekylediametre, adsorptionskræfternes virkningsradius altså meget begrænset. Den adsorberede fugtmængde må derfor stærkt afhænge af materialets specifikke overflade: Sand har således et relativt lille overfladeareal, hvorfor de bundne fugtmængder ved fugtigheder op til omkring 100 % RF er små, mens f.eks. aktivt kul eller silicagel med meget store specifikke overfladearealer er kendt som stærkt adsorberende materialer.

ad 3) Kapillarkræfterne turde være almindelig kendt. Det skal blot her erindres, at kapillarkræfterne kan udtrykkes ved formlen:

$$p = \frac{2\sigma \cos \theta}{r},$$

hvor r er lig middelfradius af porerne, σ vandets overfladespænding og θ randvinklen mellem vandoverfladen og porerne. Ved fuldstændig befugtning kan $\cos \theta$ sættes lig 1.

2.2.3. Kapillarpotentialet

Højden af den vandsøjle, et materiale er i stand til at op-suge, er et udtryk for fugtbindingsenergien - i daglig tale kalder "kapillariteten" uanset bindingsmåde.

Geoteknikerne betegner dette trykpotentiale ("kapillarpotentiale") (h [m ell. cm]) med "suctionen" (tension, sugetryk) ($s = \rho_v g h$), der ofte angives ved den såkaldte pF-værdi, hvor $pF = \log h$.

Benyttes Kelvinligningen, fås:

$$-g h = R_d \theta \ln \phi,$$

hvoraf nedenstående tabel (gældende for 20°C) er beregnet.

Tabel 3. Sammenhæng mellem relativt damptryk (φ), suction (s), ækvivalent vandsøjlehøjde (h) og pF-værdien. (Efter SOEIRO [41]).

| pF | $h(\text{cm})$ | $s = \rho_v g h(\text{kg/cm}^2)$ | $\varphi(\% \text{ RF})$ |
|-----------|----------------|----------------------------------|--------------------------|
| 0 | 1 | 10^{-3} | ~ 100 |
| 1 | 10 | 10^{-2} | ~ 100 |
| 2 | 10^2 | 10^{-1} | 99,99 |
| 3 | 10^3 | 1 | 99,92 |
| 4 | 10^4 | 10 | 99,27 |
| 5 | 10^5 | 10^2 | 93,00 |
| 6 | 10^6 | 10^3 | 48,43 |
| 7 | 10^7 | 10^4 | 0,07 |
| $-\infty$ | 0 | 0 | 100 |

Anses suctionen udelukkende at skyldes kapillarkræfterne, haves:

$$h \cong \frac{2\sigma}{r\rho_v g}$$

I ligevægt gælder således:

$$R_d \theta \rho_v \ln \frac{p}{p_s} = - \frac{2\sigma}{r}.$$

Formlen, der på formen:

$$\frac{p}{p_s} = \exp \left(\frac{-2\sigma}{\rho_v r R_d \theta} \right)$$

kaldes Thomson's formel, giver udtryk for damptryknedsættelsen over en konkav flade i forhold til en plan. Formlen er

gyldig for kapillarer i området $0,5 \cdot 10^{-7} < r < 10^{-5}$ cm. Den nedre grænse er bestemt af, at kapillarradius her er af samme størrelsesorden som vandmolekylet; for kapillarer over 10^{-5} cm er damptryknedsættelsen praktisk taget nul.

2.2.4. Den hygrotermiske ligevægtstilstand

Som tidligere nævnt nedsætter fugtbindingskraften damptrykket over de bundne vandpartikler. Er det partielle damptryk af den omgivende luft større end differensen mellem mættede dampes tryk og fugtbindingstrykkene, optager materialet fugt fra luften.

Fugtoptagelsen medfører imidlertid en formindskelse i fugtbindingskraften - de mindste porer fyldes først, afstanden mellem materialeoverflade og vandpartikler øges - og således vil en ligevægt indstille sig mellem materialets fugtindhold og det partielle damptryk af vanddampen i luften, det hygrotermiske ligevægtsfugtindhold.

Ligevægtsfugtindholdet afhænger af den omgivende lufts temperatur og fugtighed samt af måden, hvorpå ligevægtstilstanden er indtruffet - absorption eller desorption, befugtning eller udtørring.

Fugtindholdet i ligevægtstilstanden ved $0 < \phi < \text{ca. } 95\%$ RF benævnes normalt det hygroskopiske fugtindhold.

2.2.5. Sorptionskurver

Ved ændring af luftens relative fugtighed ved konstant temperatur kan opnås en sammenhæng mellem materialets fugtindhold (u) og dets damptryk, desorptions- eller absorptionsisotermen.

Fig. 5 viser et eksempel på forløbet. En fuldgældig forklaring på hysteresen er ikke givet, men forskellige hypoteser selvfølgelig fremsat. Disse skal dog ikke her belyses nærmere (se f.eks. LYKOW [30], VOS [44]).

Normalt angives middelkurven for absorptions- og desorptionskurverne; denne betegnes sorptionsisotermen eller sorptionskurven.

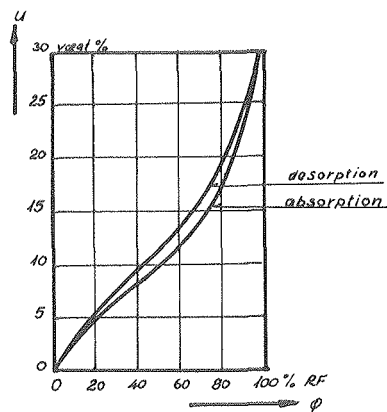


Fig. 5. Fugtligevægt for træ ved 10°C. (Eft. KRISCHER [27])
 Taux d'humidité d'équilibre pour bois à 10°C.
 Moisture equilibrium of wood at 10°C.

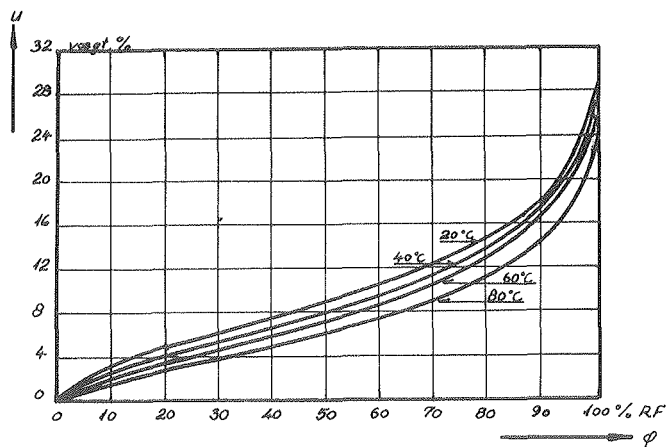


Fig. 6. Sorptionskurve for træ ved forskellige temperaturer (Efter KRISCHER [27]).
 Courbes de sorption de bois à différentes températures.
 Moisture sorption of wood at different temperatures.

Da fugtbindingskræfterne er temperaturafhængige (kapillar-kræfterne nedsættes således omkr. 0,2 % pr. °C ved opvarmning), vil også fugtindholdet afhænge af temperaturen.

Fig. 6 viser temperaturafhængigheden for træ. KRISCHER [27] angiver den til gennemsnitlig 7 % pr. °C temperaturændring.

Det ses, at temperaturafhængigheden inden for normalt forekommende temperaturintervaller er temmelig ringe, og man kan normalt for de fleste materialer se bort fra den, hvorfor navnet "sorptionskurve" foretrækkes for det tidligere almindelige "sorptionsisoterm".

Sorptionskurvens form giver udtryk for materialets evne til at optage fugt fra luften.

Hældningen af kurven i et givet punkt (φ_0, u_0) (se fig. 7):

$\xi_0 = \frac{du}{d\varphi}$ kan derfor kaldes materialets specifikke fugtkapacitet.

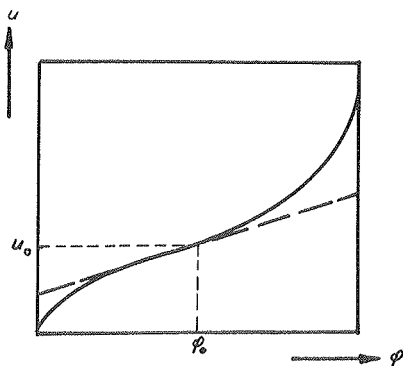


Fig. 7. "Den specifikke fugtkapacitet".

"La capacité spécifique de vapeur d'eau".

"The specific moisture capacity".

I figurerne 8A-D er vist eksempler på en række sorptionskurver. Det fremgår, at ξ_0 -værdien ofte kan sættes konstant for et større φ -interval, samt at den stiger ret voldsomt, når den relative fugtighed nærmer sig 100 % RF.

Begrebet "fugtkapacitet" omtales senere mere udførligt. Her tilføjes blot, at ξ_0 praktisk udtrykkes i g/kg tørt materiale efter følgende formel:

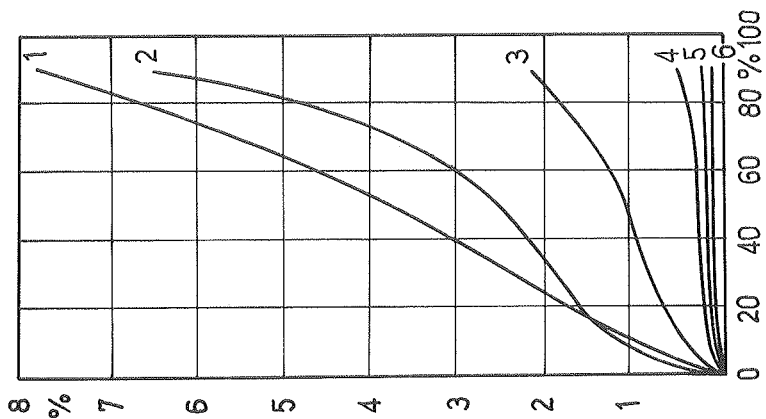


Fig. 8C

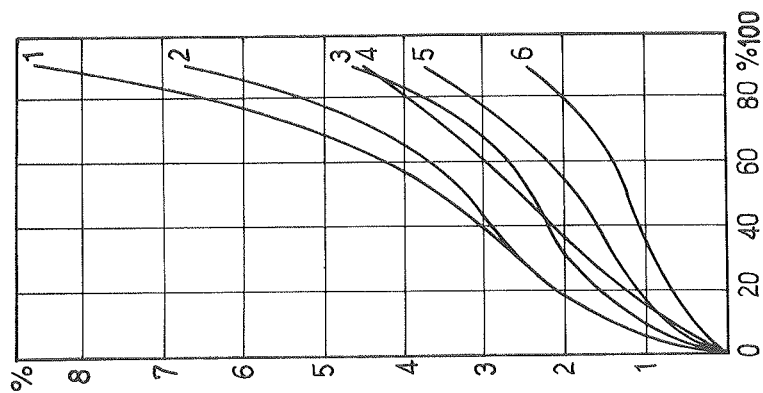


Fig. 8B

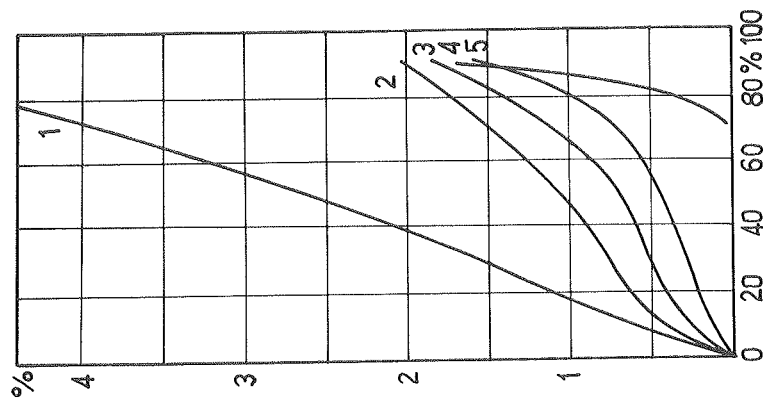


Fig. 8A

Fig. 8A.

Sorptionskurver for cement-mørtel, 2040 kg/m³ (1); Beton, 2300 kg/m³ (2); Kalk-mørtel, 1800 kg/m³ (3); Gips, 1340 kg/m³ (4); Kalk-puds, 1600 kg/m³ (5). (Efter KRISCHER [27]).

Courbes de sorption de mortier de ciment, (1); béton, (2); mortier de chaux (3); plâtre (4); enduit de chaux (5).

Moisture sorption of cement mortar (1); concrete (2); mortar (3); plasterboard (4); plaster (5).

Fig. 8B.

Sorptionskurver for "Sinterbimsbeton" 1470 kg/m³ (1); Ytong, Siporex 520 kg/m³ (2); Siporex 760 kg/m³ (3); "Hüttenbimsbeton" 1580 kg/m³ (4); slaggebeton 1140 kg/m³ (5); "Trümmersplittbeton" 1510 kg/m³ (6). (Efter KRISCHER [27]).

Courbes de sorption de "Sinterbimsbéton" (1); Ytong, Siporex (2); Siporex (3); "Hüttenbimsbéton" (4); béton de machefer (5); "Trümmersplittbéton" (6).

Moisture sorption of different light concretes.

Fig. 8C.

Sorptionskurver for kalksandsten (1); 900 kg/m³ (2); 1740 kg/m³ (3); tegl 1880 kg/m³ (4); 1530 kg/m³ (5); klinker 2050 kg/m³ (6). (Efter KRISCHER [27]).

Courbes de sorption de pierre calcaire (1); (2); (3); terre cuite (tuile) (4); (brique) (5); (Klinker, brique hollandaise) (6).

Moisture sorption of limestone (1), (2), (3); tile (4); brick (5); clinker (dutch brick) (6).

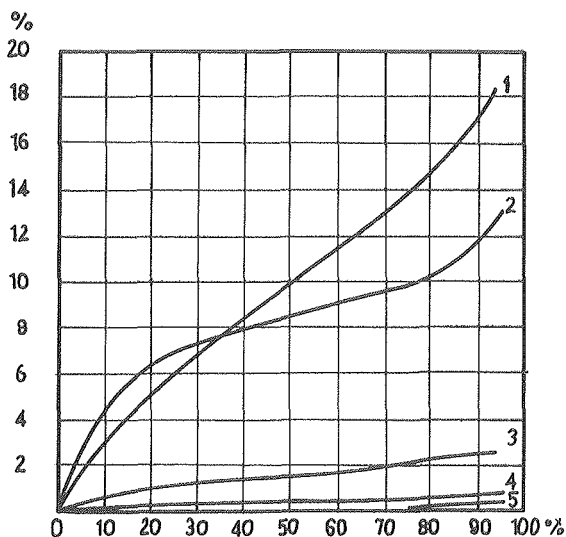


Fig. 8 D. Sorptionskurver for Stramit 250 kg/m³ (1); træld-beton 300 kg/m³ (2); kork 95 kg/m³ (3); glasuldplade 120 kg/m³ (4); mineraluld (5). (Efter KRISHER [27]).

Courbes de sorption de "Stramit" (1); béton de copeaux de bois (2); liège (3); plaque de laine de verre (4); laines minérales (5).

Moisture sorption of cement impregnated strawboard (1); cement impregnated wood wool (2); cork (3); glass wool board (4); mineral wool (5).

$$\xi_o = \frac{du}{d\varphi} \times 1000 \text{ (g/kg) ,}$$

hvor u udtrykkes i vægt% og φ i % RF.

Traditionelt anses den hygroscopiske fugtbinding at skyldes kapillære kræfter som udtrykt gennem Thomson's formel. I det mindste de laveste stærkt bundne fugtindhold skyldes dog adsorptive kræfter. LYKOW anfører, at sorptionskurvens begyndelsesafsnit med stærk hældning ($0 < \varphi < 10\%$) skyldes monomole-

kylær adsorption, afsnittet til omkring $\varphi = 95\%$ skyldes flerlagsadsorption, og først ved de højeste luftfugtigheder lukker væskesøjlen i de kapillare hulrum, hvorved kapillarkræfterne træder til, og fugtindholdet stiger så atter kraftigt i det sidste afsnit af sorptionskurven.

I tabel 4 er (efter LYKOW [30]) vist vanddamptrykket, udtrykt ved den relative fugtighed φ , i afhængighed af kapillarradius r (i cm) beregnet for en vandtemperatur på 20°C efter Thomson-formlen.

Tabel 4: Relativ fugtighed med kondensation i kapillarrør med radius r

| $\varphi(\%)$ | $r \times 10^7$ (cm) | φ | $r \times 10^7$ | φ | $r \times 10^7$ |
|---------------|----------------------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|
| 5 | 0,36 | 50 | 1,56 | 95 | 21,9 |
| 10 | 0,46 | 55 | 1,80 | 96 | 26,3 |
| 15 | 0,57 | 60 | 2,11 | 97 | 35,3 |
| 20 | 0,67 | 65 | 2,50 | 98 | 53,3 |
| 25 | 0,78 | 70 | 3,01 | 99 | 107,5 |
| 30 | 0,89 | 75 | 3,73 | 99,9 | 1077,0 |
| 35 | 1,02 | 80 | 4,83 | 99,99 | 1077,0 |
| 40 | 1,17 | 85 | 6,61 | 1.000 | |
| 45 | 1,34 | 90 | 10,25 | | |

Det fremgår heraf, at sorptionskurven ikke kan gøre rede for større fugtindhold end svarende til $\varphi < 95\%$ RF. Dels udgøres en væsentlig del af et byggematerials porevolumen af porer så store, at damptryknedsettelsen er uvæsentlig, og dels forekommer grænsen til $\varphi = 100\%$ RF temmelig "flydende".

Fugtindhold over det hygroskopiske kan kaldes frit vand (jvf. JOHANSSON [23]), idet bindingsenergien er lille i forhold til

det hygroskopisk bundne; den til sådanne fugtindhold svarende luftfugtighed må i praksis sættes til 100% RF. (fig. 9A og B).

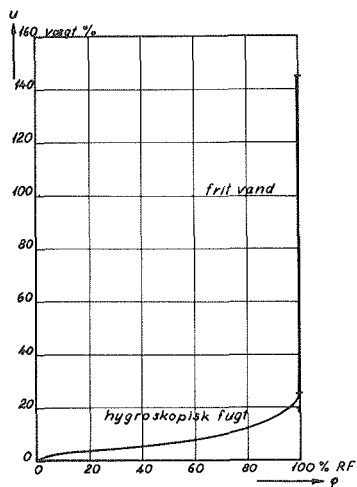


Fig. 9A. Hygroskopisk fugt og frit vand i fyr (Efter JOHANSSON[23]).

Humidité hygroskopique et de l'eau libre en sapin.

Hygroscopic moisture and free water content of pine.

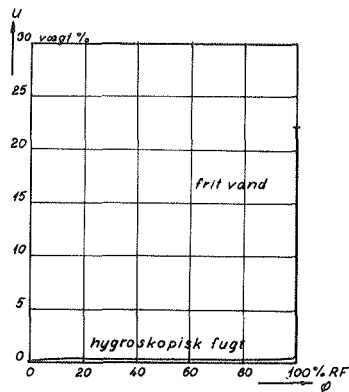


Fig. 9B. Hygroskopisk fugt og frit vand i tegl [23].

Humidité hygroskopique et de l'eau libre en brique.

Hygroscopic moisture and free water content of brick.

Som det ses, karakteriseres materialets fugtindhold ikke fuldstændigt gennem sorptionskurven $u = f(\phi)$. Retteligen bør fugtindholdet måske karakteriseres ved frigørelsesenergien, pF-værdien eller suctionen, som det skal vises i det følgende.

2.2.6. Suctionscurver (trykpotentialkurver)

Suctionsbegrebet anvendt på bygningsmaterialer er ganske nyt. Da vi imidlertid anser det for givet, at suctionskurver vil finde anvendelse som materialekarakteristik bl.a. m.h.t. kapillære egenskaber, skal de omtales lidt nærmere. Det følgende kan blot opfattes som en særdeles kortfattet orientering, her i hovedsagen gengivet efter PENNER [34], hos hvem man tillige finder en litteraturoversigt vedr. suctionsbegrebets anvendelse ved karakterisering af jordarters fugtighed.

Suctionen er som vist et udtryk for fugtbindingskraften. I det foregående er tillige vist sammenhængen mellem den kapillære stighøjde h - reel eller imaginær - og den termodynamisk udledede bindingskraft.

Tabel 3 viser sammenhængen mellem pF , h , $p/p_s = \phi$ samt suge-trykket (tensionen) $s = \rho_v g h$.

I fig. 10 er grafisk vist sammenhængen mellem det relative damptryk p/p_s og sugehøjden h (cm) ved 20°C.

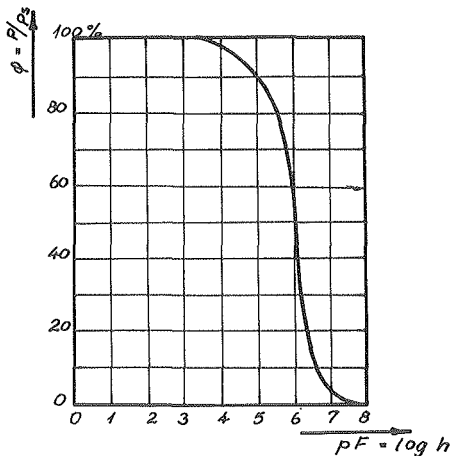


Fig. 10. Sammenhæng mellem rel.fugtighed (ved 20°C) og pF -værdien.

Relation entre humidité relative (à 20°C) et la valeur pF .

Relationship between pF and relative humidity at 20°C.

Det ses, at selv meget små ændringer i den relative fugtighed omkring mætningspunktet vil betyde kraftige ændringer i suctionen. Suctionsbegrebet er altså netop i stand til at "dække" området omkring 100% RF.

Suctionen er her sat i forbindelse med kapillaregenskaberne. Begrebet er imidlertid gyldigt uanset fugtbindingsarten, og fugtindholdet kan således (i princippet) angives entydigt i afhængighed af suctionen.

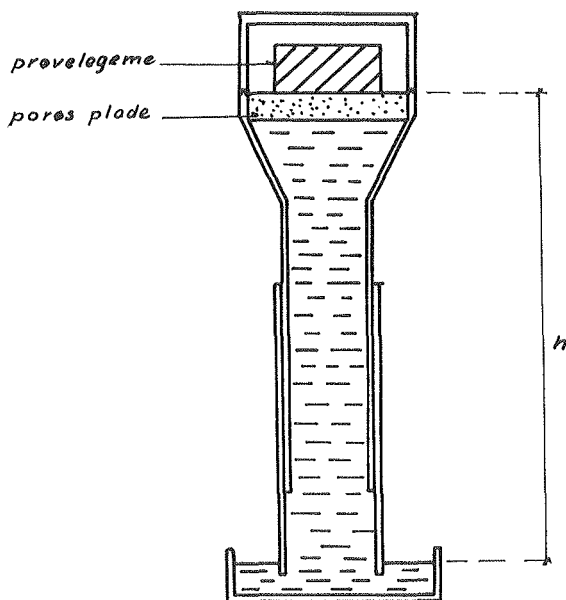


Fig. 11. Måling af suctionen (princip).

La mesure de la suction (principe).

Measurement of the suction.

Suctionsmaalinger foretages principielt som vist i fig. 11. Den porøse plade sætter prøvelegemet i fugtforbindelse med vandsøjlen, men lukker iøvrigt lufttæt. Prøvelegemets ligevægtsfugtindhold bestemmes dernæst for varierende sugehøjder h .

Den praktiske udførelse af målingerne skal ikke behandles her. Der henvises til f.eks. PENNER og SOEIRO [34, 41].

Direkte suctionsmålinger er rent teknisk særdeles vanskelige for pF -værdier over ca. 4 (10 kp/cm^2). For pF -værdier herover benyttes bedst den almindelige teknik til optagelse af sorptionskurverne, hvorefter omregning fra ϕ til sugestykket foretages.

Direkte målinger er dog udført op til pF 6,2 (1500 kp/cm^2); resultaterne heraf er identiske med de fra sorptionskurverne beregnede og har således kunnet bekræfte selve suctionsteorien.

Et eksempel på suctionskurven for træ (gran) er (efter PENNER [34]) vist på fig. 12. Med punkteret linie er vist øvre grænse for det hygroskopiske fugtindhold. Det ses, hvorledes suctionskurven redegør for fugtbindingen helt op til fuldstændig poremætning. Endvidere bemærkes en kraftig hysteresese.

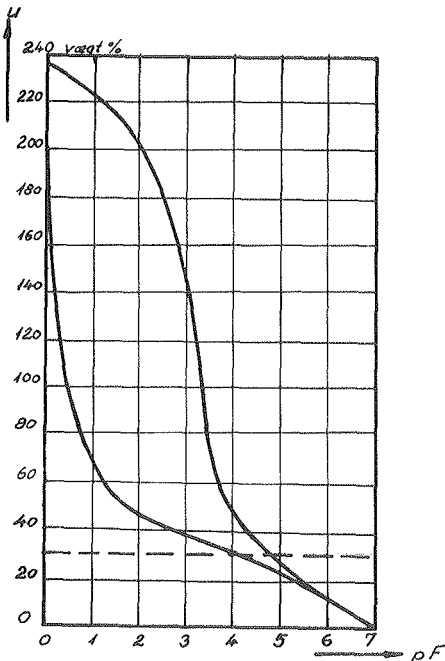


Fig. 12. Suctionskurve for gran (v. 20°C). (Efter PENNER [34]).

Courbe de suction de sapin.

Suction-water content curve for spruce.

Suctionsbegrebet anvendt på bygningsmaterialer er som nævnt nyt og har os bekendt endnu ikke fundet praktisk anvendelse.

Vi har imidlertid medtaget det under omtalen af byggematerialers fugtindhold, idet man sandsynligvis heri vil finde mulighed for at behandle en række spørgsmål i forbindelse med fugtige materialer, som ikke hidtil har fundet deres endelige løsning. Således kan nævnes fugtabsorption ved "kapillarsugning", karakterisering af "fugtmættede" materialer, m.v.

2.3. Fugttransport i porøse materialer

2.3.1. Indledning

Fugt transporteres i to former: dampform og væskeform. Fugttransport i dampform kaldes i daglig tale "diffusion", mens transporten i væskeform ofte kaldes "kapillarsugning".

I det følgende skal grundformlerne for "ren" vanddampdiffusion såvel som "ren" kapillarsugning gennemgås.

Fugttransport i dampform er imidlertid formentlig ikke alene en diffusionsproces og fugttransport i væskeform ikke alene kapillarsugning; flere andre transportformer findes, som det kort skal omtales i slutningen af kapitlet.

De følgende teoretisk prægede udledninger vedrører derfor kun de vigtigste transportformer og kan kun betragtes som vejledende ved en praktisk behandling af fænomenerne.

Fugttransport vil som regel forekomme som en kombination af vand i damp- - såvel som i væskefase, dog således at man må formode, at dampfasen er den overvejende ved lavere fugtindhold, mens væskefasen er den vigtigste ved større. Vi skal komme nærmere ind herpå i afsnittet: "Kombineret damp- og væsketransport".

Iøvrigt bemærkes, at fugttransportfænomenerne er så komplekse, at en fuldstændig teoretisk udredning ikke er mulig, og de for et materiale specifikke transportkoefficienter kan formentlig kun findes ad empirisk vej (jvf. også HUTCHEON's bemærkninger herom [20]).

Af samme grund kan de i det følgende forekommende "materialekonstanter" kun i praksis forventes konstante inden for ret snævre temperatur- og fugtintervaller.

2.3.2. Vanddampdiffusion

2.3.2.1. Diffusion i luft

For diffusion i luft gælder Fich's lov:

$$g_d = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (1), \quad \text{hvor}$$

g_d er den diffunderende dampmængde pr. tids- og arealenhed,

c er dampkoncentrationen i luften og

D diffusionskoefficienten for vanddamp i stillestående luft.

Idet vanddamp betragtes som en ideel luftart, kan (1), forudsat konstant temperatur, omformes til:

$$g_d = -D \frac{1}{R_d \theta} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad \text{hvor}$$

θ er den absolutte temperatur,

R_d gaskonstanten for vanddamp og

p partialtrykket.

Formel (1) kan kaldes den almindelige diffusionslov. For det specielle tilfælde: énsidig diffusion (f.eks. fordampning gennem et rør) gælder Stefan's lov:

$$g_d = -D \frac{B}{B-p} \frac{\partial c}{\partial x} \quad \text{eller:}$$

$$g_d = -D \frac{B}{B-p} \frac{1}{R_d \theta} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2), \quad \text{hvor}$$

B er det herskende totaltryk.

Ved integration af (2) fås (fig. 13):

$$g_d = D \frac{B}{R_d \theta} \frac{1}{l} \ln \frac{B-p}{B-p_s} \quad \text{eller:}$$

$$g_d = \frac{D}{R_d \theta} \frac{B}{B-p_m} \frac{p_s - p}{l} \quad (3), \quad \text{idet}$$

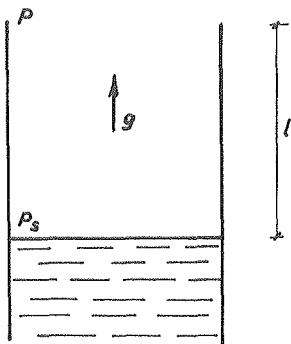


Fig. 13.

Énsidig diffusion

Diffusion unilatérale

Unilateral diffusion

luftens middelpartialtryk:

$$B - p_m = \frac{p_s - p}{\ln \frac{B-p}{B-p_s}}$$

er indført (KRISCHER [27] pag. 178).

Det ses, at når damptrykket er lille i forhold til totaltrykket, kan Fich's og Stefan's love anvendes i flæng. Ved temperaturer under 35°C vil fejlen ikke overstige ca. 5%.

Den sædvanlige diffusionsteori og de heraf udledede formler gælder for luftarter, der ikke reagerer med hinanden eller med den faste form af stoffet. Den kan altså til en vis grad forventes gyldig for vanddamp.

Diffusionskoefficienten D for umættet vanddamp i luft er i temperaturintervallet 20° - 90°C bestemt til:

$$D = 0,083 \frac{10.000}{B} \left(\frac{\theta}{273}\right)^{1,81} \quad (\text{m}^2/\text{h})$$

og for mættet vanddamp:

$$D = 0,086 \frac{10.000}{B} \left(\frac{\theta}{273}\right)^{2,3} \quad (\text{m}^2/\text{h})$$

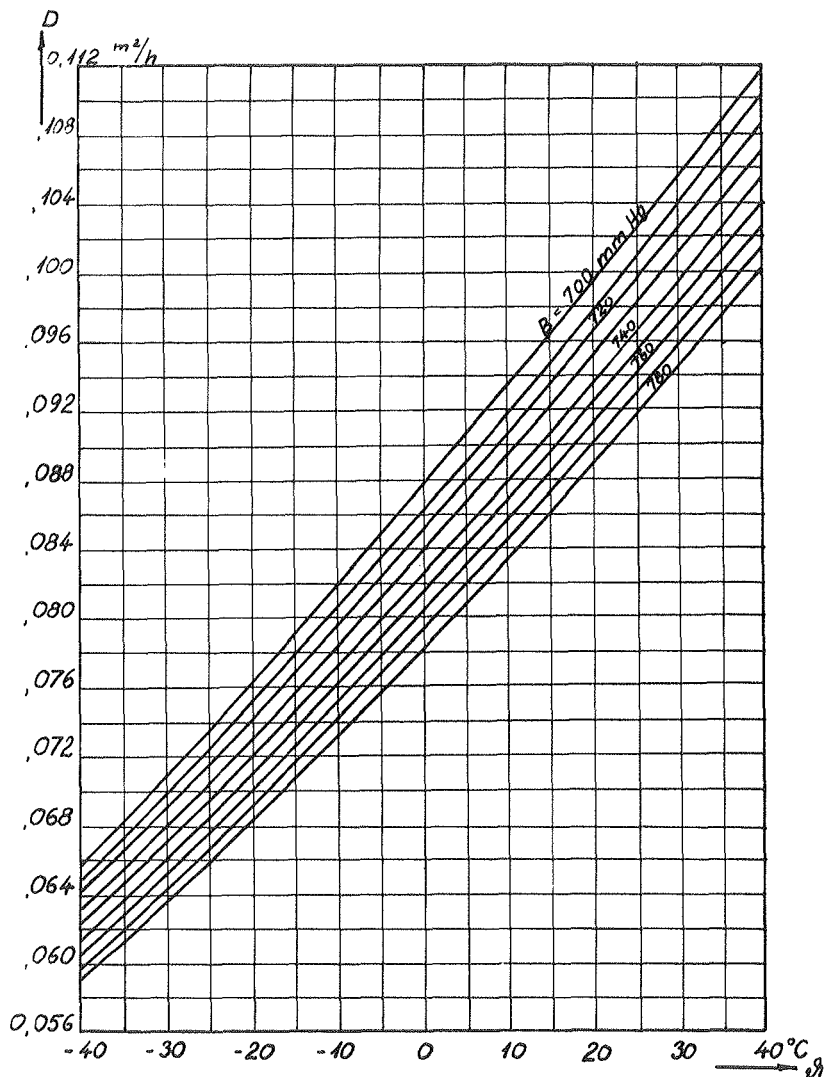


Fig. 14. Diffusionskoefficienten for vanddamps diffusion i luft. (Efter GLASER).

Le coefficient de diffusion pour vapeur d'eau dans l'air.

The diffusion coefficient for water vapour in air.

hvor trykket B måles i kp/m^2 . (KRISCHER [27] pag. 175 og 271).

Formlerne gælder for isoterme forhold. For vanddamps diffusion under en temperaturgradient savnes oplysninger (PHILIP og DE VRIES [35]).

Fig. 14 viser D 's temperatur- og trykafhængighed (umættet vanddamp).

2.3.2.2. Diffusion i porøse materialer

For vanddamps diffusion i porøse materialer benyttes de til (2) og (3) svarende udtryk, idet D erstattes med d' , diffusionskoefficienten for vanddamp i materialet, eller med D/μ , hvor μ er "diffusionsmodstandsfaktoren", der angiver hvor meget mindre diffusionen er gennem en given materialetykkelse end gennem et stillestående luftlag ved samme temperatur og med samme tykkelse og tværsnit.

Stefan's lov antager formen:

$$\varepsilon_d = \frac{d'}{R_d \theta} B \frac{1}{e} \ln \frac{B-p_2}{B-p_1}$$

eller på differentialform:

$$\varepsilon_d = - \frac{d'}{R_d \theta} \frac{B}{B-p} \frac{\partial p}{\partial x}$$

e er materialetykkelsen, p_1 og p_2 de partielle damptryk på hver side af materialet.

d' afhænger af materialets fugtindhold, porøsitet o.a.

Ved de fleste praktiske diffusionsberegninger for porøse materialer vil man ofte med betydelig beregningsmæssig fordel og uden større unøjagtighed kunne benytte formlen:

$$\varepsilon_d = - d \frac{\partial p}{\partial x} \quad (4),$$

hvor d benævnes diffusionstallet eller damppermeabiliteten.

Den sidste betegnelse benyttes almindeligvis i international sprogbrug, hvorimod den første vil blive anvendt i det følgende, da den dels falder mere mundret på dansk, men især da analogien herved knyttes til varmetransmissionen. (Diffusionstal \sim varmeledningstal).

Det ses, at

$$d = \frac{d'}{R_d \theta} \frac{B}{B-p} = \frac{D}{\mu R_d \theta} \frac{B}{B-p};$$

d er altså temperatur- og trykafhængig. Den sidste er ganske ubetydelig; fig. 15 viser $(D/\theta \cdot B/B-p_s)$'s maximale temperaturafhængighed (ved $B = 760$ mmHg), idet p er sat lig p_s - de mættede dampes tryk ved den herskende temperatur. Som reference er benyttet $\theta = 16^\circ\text{C}$; årsagen hertil forklares nedenfor.

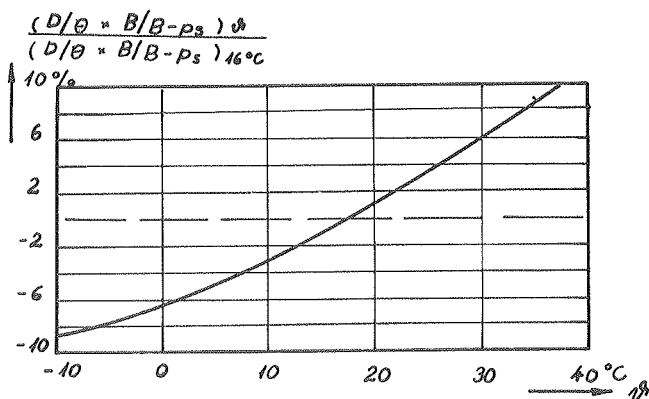


Fig. 15. Det teoretiske diffusionstals temperaturafhængighed.

L'influence de la temperature sur la perméabilité théorique.

The influence of the temperature on the theoretic permeability value.

Det ses, at for praktiske beregninger kan diffusionstallet oftest med rimelighed regnes uafhængig af temperaturen.

Fejlen vil i hvert fald ikke overskride $\pm 10\%$ i intervallet $-10^\circ\text{C} < \vartheta < 35^\circ\text{C}$, hvilket normalt vil være acceptabelt under hensyn til den usikkerhed, hvormed diffusionstallet er kendt.

Gaskonstanten for vanddamp er: $R_d = 47,1 \text{ mkp/kg}^\circ\text{K}$, når trykket udtrykkes i kp/m^2 , længde i m og masse i kg.

Udtrykkes længde i m, masse i g og tryk i mmHg, fås:

$$R_d = 47,1 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{13,6} = 3,46 \cdot 10^{-3} \approx \frac{1}{289} \text{ mmHg m}^3/\text{g}^\circ\text{K}.$$

Det ses, at $R_d \cdot \vartheta$ for $\vartheta = 16^\circ\text{C}$ ($T = 289^\circ\text{K}$) i dette enhedssystem er lig 1, d.v.s. talmæssigt er diffusionskoefficienten for materialet, $d' = D/\mu$ (i m^2/h) identisk med diffusionstallet d (i g/mhmmHg), og med rimelig nøjagtighed haves:

$$d \approx D/\mu \approx \frac{0,09}{\mu}$$

2.3.2.3. Diffusion under ikke-isoterme forhold

I det foregående er vist, hvorledes fugtdiffusionen gennem porøse materialer kan udtrykkes med luftens (evt. poreluftens) partielle vanddamptryk eller dampkoncentration som gradient. Dette gælder for såvel isoterme som ikke-isoterme forhold.

Ved fugtdiffusion, hvor en temperaturgradient er til stede, er det imidlertid af interesse at dele fugttransmissionen i en "termisk" og en "isotermisk" komponent (jvf. f.eks. LYKOW [30], PHILIP og DE VRIES [35], GLOBUS og NERPIN [16] m.fl.).

LYKOW udtrykker således fugttransmissionen på den generelle form:

$$g = -k \rho_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial x} - k \rho_0 \delta \frac{\partial \vartheta}{\partial x}, \quad \text{hvor}$$

k er "fugtleddningstallet",

ρ_0 materialets rumvægt i tør tilstand,

u fugtindholdet og

δ "temperaturgradientfaktoren".

Det skal nu vises, hvorledes diffusionsligningerne kan omformes til denne form.

For at forenkle udledningerne vælges her den simple diffusionsligning: $g_d = -d \frac{\partial p}{\partial x}$. Analoge omformninger fås selvfølgelig med de lidt mere komplicerede ligningsudtryk.

Damppartialtrykkene i materialet afhænger såvel af temperaturen som af det tilstedeværende fugtindhold: $p = f(\vartheta, u)$.

Følgelig haves for gradienten:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial \vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial x}$$

For nu at undersøge $\frac{\partial p}{\partial \vartheta}$ foretages følgende omskrivning:

$$\frac{\partial p}{\partial \vartheta} = \frac{\partial (\varphi p_s)}{\partial \vartheta} = \frac{\partial \varphi}{\partial \vartheta} p_s + \frac{\partial p_s}{\partial \vartheta} \varphi$$

φ 's afhængighed af temperaturen for konstant fugtindhold fremgår f.eks. af materialets sorptionskurver optaget ved forskellige temperaturer. Det fremgår heraf, at temperaturafhængigheden er ret ringe (jvf. f.eks. TVEIT [43] eller KRISCHER [27]).

Teoretiske overvejelser vedrørende fugtabsorptionens natur (PHILIP og DE VRIES [35]) fører til samme resultat.

I første tilnærmelse sættes altså $\frac{\partial \varphi}{\partial \vartheta} \sim 0$.

$\frac{\partial p}{\partial u}$ fås af sorptionskurvens hældning, $\frac{\partial u}{\partial \varphi} = \xi_0$, idet

$$\frac{\partial \varphi}{\partial u} = \frac{\partial p}{\partial u} p_s^{-1}, \text{ hvoraf: } \frac{\partial p}{\partial u} = \frac{p_s}{\xi_0}.$$

Fugttransportligningen ved diffusion får altså formen:

$$\varepsilon_d = -d\left[\frac{\partial p_s}{\partial \theta} \varphi \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{p_s}{\xi_o} \frac{\partial u}{\partial x}\right]$$

Det er således vist, hvorledes fugtdiffusionen kan opdeles i en termisk og en isotermisk del med koefficienter, der kan bestemmes ud fra kendskabet til materialets sorptionskurve samt diffusionstal.

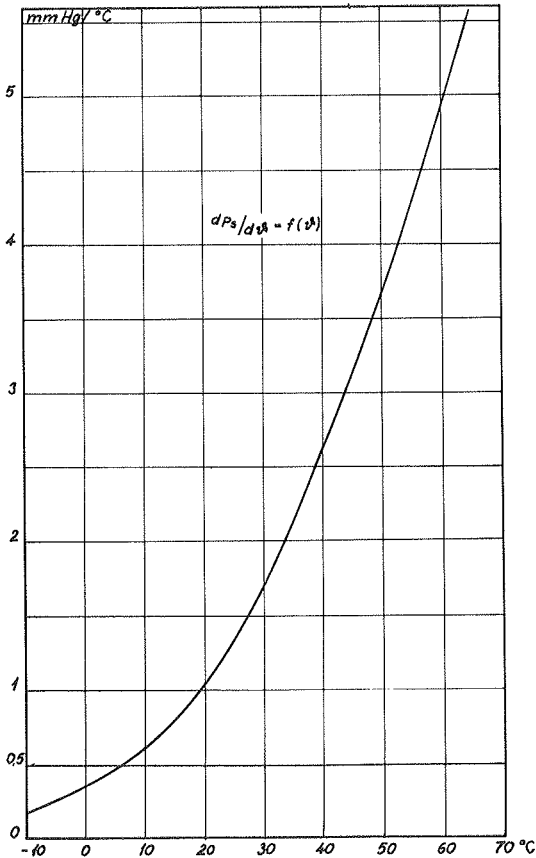


Fig. 16. Mætningstrykkets 1. afledede.

1. dérivée de la pression de saturation.

The differential coefficient of the saturation pressure.

Indføres fugtledningstallet k og temperaturgradientfaktoren δ fås:

$$k = \frac{d}{\xi_0 \rho_0} p_s \quad \text{og} \quad \delta = \frac{\xi_0}{p_s} \frac{\partial p_s}{\partial \vartheta} \varphi$$

Fig. 16 viser $\frac{\partial p_s}{\partial \vartheta} = f(\vartheta)$ for temperaturintervallet $-10^\circ\text{C} < \vartheta < +65^\circ\text{C}$.

2.3.3. Fugttransport i væskeform ("kapillarsugning")

For fugttransport af vand i væskeform gælder Darcy's lov:

$$g_1 = -\kappa \rho_v \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad (5), \quad \text{hvor}$$

g_1 er den transporterede væskemængde pr. tids- og arealenhed,

Φ er potentialet, sammensat af bidraget fra tyngden samt bidraget fra kapillarpotentialet h :

$$\Phi = z + h, \quad \text{hvor}$$

z er den lodrette ordinat.

κ er "den kapillære ledningsevne", der afhænger af fugtindholdet, væskens viskositet samt af legemets porøsitet.

Fig. 17 viser vands viskositet ved forskellige temperaturer.

Da κ -værdien er omvendt proportional med viskositeten, ses således, at temperaturniveauet vil have væsentlig indflydelse på fugttransporten: højere temperatur vil betyde øget fugttransport.

En vanddråbe på tørt træpapir eller sand udbreder sig kun på et skarpt afgrænset område. Heraf ses, at kapillarsugningen øjensynligt ikke finder sted ved tørre materialer, κ -værdien må sættes til nul.

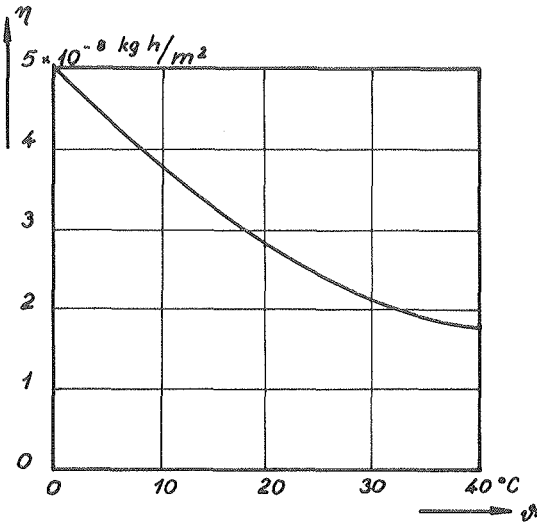


Fig. 17. Vands viskositet.

La viscosité de l'eau.

Viscosity of water.

Dette fænomen antyder, at under et vist fugtindhold, det "kritiske fugtindhold", er fugttransport i væskeform ikke længere mulig. VOS [46] har nylig uddybet og sandsynliggjort dette.

Som ved den foregående omtale af dampfasen vil vi opdele grundligningen i en temperaturafhængig samt en fugtkoncentrationsafhængig del.

Idet tyngdens indflydelse lades ude af betragtning, omskrives (5):

$$\varepsilon_1 = -\kappa \rho_v \left[\frac{\partial h}{\partial \vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial x} \right]$$

Potentialet h er tidligere omtalt. Det blev her vist, at h for større fugtindhold er proportional med overfladespændingen σ . For $\partial h / \partial \vartheta$ haves således:

$$\frac{\partial h}{\partial \vartheta} = \frac{\partial h}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \vartheta} = \frac{h}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \vartheta} = h \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \vartheta} \frac{1}{\sigma} \right)$$

Den sidste faktor er relativt lidet temperaturafhængig og kan sættes konstant. h afhænger af fugtindholdet, men er ligeledes ret uafhængig af temperaturen.

$\partial h / \partial u$ fås som hældningen af den tidligere omtalte suctionskurve.

Det er således vist, at også fugttransporten i væskeform kan udtrykkes på den generelle form:

$$g_1 = -k\rho_o \frac{\partial u}{\partial x} - k\rho_o \delta \frac{\partial \vartheta}{\partial x}$$

Foruden af fugtindholdet vil koefficienterne her afhænge af κ -værdien og hermed væsentligst af temperaturen, idet κ som nævnt afhænger af viskositeten.

Ved fugttransport i dampform synes såvel det temperaturafhængige led som det isoterme at have væsentlig betydning for den totale fugttransport.

I modsætning hertil kan det vises (jvf. VOS [46]), at temperaturgradientledet ved kapillarsugning normalt er af så lille størrelsesorden i forhold til det isoterme led, at der kan ses bort fra det.

2.3.4. Andre fugttransportformer

I det foregående er udelukkende behandlet de vigtigste og bedst kendte fugttransportformer: diffusion af vanddamp og kapillarbevægelse af vand i væskeform. Hertil kommer imidlertid yderligere en række transportformer, hvoraf de vigtigste kort skal nævnes (efter TVEIT [42]).

2.3.4.1. Dampform

1) Når porediameterne er mindre end vanddampmolekylernes frie vejtlængde, foregår transporten som effusion.

En statistisk beregning af antallet af molekyler, der forlader et kapillar pr. tidsenhed, giver følgende udtryk for damptransporten i et kapillarrør med radius r og længde l :

$$g = \frac{8\pi}{3} \frac{r^3}{l} \sqrt{\frac{1}{2\pi R_d}} \left(\frac{p_1}{\sqrt{\theta_1}} - \frac{p_2}{\sqrt{\theta_2}} \right), \quad \text{hvor}$$

$(p_1 - p_2)$ og $(\theta_1 - \theta_2)$ er damptryk- og temperaturforskellene.

Det ses, at hvis damptrykket er det samme, vil en temperaturgradient forårsage en effusion med retning mod den højeste temperatur.

2) Ved et temperaturfald gennem porøse materialer opstår en termisk diffusion, idet de tungere molekyler diffunderer i retning af temperaturfaldet og de lettere i modsat retning.

Vanddampmolekyler er lette molekyler og vil søge i retning af den højere temperatur.

3) I lufttutætte materialer vil der endelig kunne foregå en damptransport p.gr. af konvektion og vindpåvirkning, altså lufttrykforskelle.

2.3.4.2. Væskeform

1) Indeholder det porøse legeme opløselige salte, vil en osmotisk trykdifferens kunne opstå p.gr. af forskellig saltkoncentration, og denne vil fremkalde en molekylær transport af vandet.

2) Endvidere findes forskellige former for overfladekrybning, hvor vandmolekylerne i et tyndt lag bevæger sig langs kapillær væggene. Overfladekrybningen kan dels være termisk dirigeret dels skyldes forskelle i bindingskræfterne i det adsorberede lag.

2.3.5. Kombineret damp- og væsketransport

Som nævnt i indledningen til dette afsnit vil fugttransport i almindelighed være en kombination af vand i damp- såvel som i væskeform, hvor den sidste må formodes at være den

fremherskende ved større fugtindhold, hvor flere porer er vandfyldte.

Det er blevet almindeligt - formentlig efter KRISCHER - at betragte fugttransporten som sammensat af vanddampdiffusion p.gr. af partialtrykgradienter og kapillarsugning, der skyldes forskelle i fugtindhold:

$$g = g_d + g_l = -d \frac{\partial p}{\partial x} - k \rho_o \frac{\partial u}{\partial x} \quad (6)$$

hvor k er "kapillarledningstallet".

En sådan skelnen viser sig ofte praktisk anvendelig; man må imidlertid gøre sig klart, at formelen kun delvis modsvares af fysiske realiteter.

JOHANSSON [24], der ligeledes benyttede grundligningen (6), indså dette og indførte begreberne "lokal kapillarsugning" og "fugtudjævnende kapillarsugning". Den sidste virker udjævnende på forskelle i fugtindhold (andet led i (6)); den første skal beskrives nedenfor.

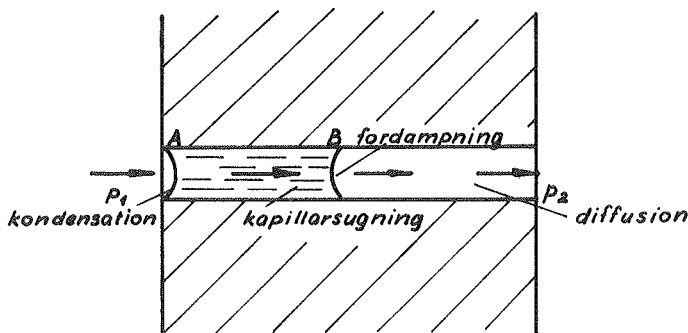


Fig. 18. "Lokal kapillarsugning".

"Succion capillaire locale".

"Local capillary suction".

En simpel model af et porøst materiale er et enkelt kapillarrør (fig. 18). Såfremt $p_1 < p_d$, hvor p_d angiver damptrykket

over et kapillarrør med diameter d (jvf. afsnittet om porøse materialers fugtindhold), er poren luftfyldt, og fugtgennemgangen vil være en ren diffusion.

Gælder det, at $p_1 > p_d > p_2$, er poren delvis vandfyldt, og fugttransporten foregår som vist ved kondensation, kapillarsugning, fordampning og diffusion. Kapillarsugningen kommer i stand, idet kondensation ved A medfører mindre meniskekrumning og fordampning ved B større meniskekrumning.

PHILIP og DE VRIES [35] har benyttet en lignende hypotese til forklaring af det faktum, at fugttransport under temperaturgradienters indflydelse ofte giver større værdier end forventet efter isoterme målinger af diffusionstallet:

Da væskestrømmen gennem de vandfyldte porer antages at indstille sig i takt med dampstrømmen, må fugttransmissionen altså være proportional med partialtrykgradienten over de luftfyldte porer.

Dampstrømmen gennem en luftfyldt pore kan sættes til:

$$g_d = -D \frac{\partial p_s}{\partial \vartheta} \varphi \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right)_p,$$

hvor $\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right)_p$ angiver temperaturgradienten i poren.

Betegner $\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right)_p$ den gennemsnitlige temperaturgradient og p materialets porøsitet, kan den totale dampstrøm altså udtrykkes:

$$g_d = -p D \frac{\partial p_s}{\partial \vartheta} \varphi \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right)_p$$

Sammenlignes dette udtryk med det tidligere udledte:

$$g_d = -d \frac{\partial p_s}{\partial \vartheta} \varphi \frac{\partial \vartheta}{\partial x}, \text{ fås}$$

for forholdet mellem dampstrømmene med og uden den lokale kapillarsugning taget i betragtning:

$$\eta = p \frac{D}{d} \frac{\left(\frac{\partial \theta}{\partial x}\right)_p}{\left(\frac{\partial \theta}{\partial x}\right)} = p \frac{D}{d} \xi$$

Ud fra visse antagelser vedr. porestruktur m.v. beregner PHILIP og DE VRIES ξ for en række tilfælde. Af resultaterne herfra skal blot nævnes, at produktet $\xi \cdot p$ synes at variere relativt beskedent, nemlig i intervallet $0,6 < \xi p < 1,0$.

Rent kvalitativt kan man af PHILIP og DE VRIES's hypotese udlede, at det tilsyneladende diffusionstal for fugtige materialer, hvorover der hersker en temperaturgradient, vil være af samme størrelsesorden som lufts.

Det er i denne forbindelse interessant at nævne nogle forsøg af GLOBUS og NERPIN [16] over den termisk betingede fugttransport i nogle jordarter. Det konkluderes heri bl.a., at denne kun afhænger svagt af det porøse materiales egenskaber, men hovedsageligt er bestemt af fugtindholdet og varierer inden for grænserne $1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-7}$ g/cm s grad. Sammenlignes denne oplysning med det simple udtryk for dampdiffusion under temperaturgradient:

$$g_d = -d \frac{\partial p_s}{\partial \theta} \varphi \frac{\partial \theta}{\partial x}, \text{ og sættes } \varphi \sim 1,$$

kan de ovenstående grænser udtrykkes:

$$360 \cdot 10^{-3} \partial \theta / \partial p_s \sim 36 \cdot 10^{-3} \partial \theta / \partial p_s \quad (\text{g/mhmmHg})$$

Idet det erindres, at $\partial p_s / \partial \theta$ i temperaturintervallet $0^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}$ varierer mellem $0,35 - 3,7$ mmHg/ $^\circ\text{C}$, kan dette opfattes som en bekræftelse på PHILIP og DE VRIES hypotese.

Det kan endvidere være af interesse at nævne, at GLOBUS og NERPIN ved hjælp af radioaktive tracere konstaterede, at den termisk betingede fugttransport er i dampform, hvorimod en

væskebevægelse rettet mod den højeste temperatur konstateres; endvidere synes en evt. zone omkring frysepunktet at tiltrække en væskestrøm.

Den termisk betingede fugttransport øges med temperaturgradient og -niveau.

2.3.6. Sammen drag

I det foregående er indledningsvis vist den traditionelle "basis" for betragtninger vedr. fugtgennemgang i byggematerialer.

Betragtningerne fører til den simple diffusionsligning:

$$g = -d\partial p/\partial x ,$$

der har vist sig anvendelig for mange praktiske formål (jvf. et følgende afsnit om praktiske beregningsmetoder).

Formlen giver i princippet kun udtryk for damptransporten. Det er imidlertid vist, at denne oftest vil være overlejlret af en kapillar væsketransport, der dels kan være ensrettet med damptransporten, dels modsat rettet.

For en del af kapillartransporten tages der umiddelbart højde ved en eksperimentel bestemmelse af diffusionstallet d , i det fugttransporten kun makroskopisk set er ren dampdiffusion. Den kapillartransport, der afhænger af materialets fugtindhold - den egentlige kapillarsugning -, vil det normalt ikke være muligt at tage i regning.

Det er vist, at fugttransporten kan spaltes op i en termisk betinget del - p.gr. af temperaturgradienten - samt en transport p.gr. af forskelle i fugtindhold. Det synes sandsynligt, at temperaturgradienten vil bevirke en stigning i det tilsyneladende diffusionstal, stigningens størrelse vil formentlig afhænge af materialets fugtindhold, temperaturgradienten samt temperaturniveauet.

3. MÅLING AF PORØSE MATERIALERS FUGTTRANSPORTEGENSKABER

3.1. Diffusionstallet

Den vigtigste størrelse, der fordres kendskab til med henblik på en praktisk bestemmelse af et materiales fugttransportegenskaber, er diffusionstallet d , som beskriver materialets egenskaber m.h.t. vanddamptransporten.

Basis for målingerne af diffusionstallet er den simple fugttransportligning $g = -d \frac{\partial p}{\partial x}$.

Ligningen er - som vist i det foregående - udledt på grundlag af udtrykket for vanddamps diffusion i luft. Da fugttransporten i et porøst legeme formentlig er en særdeles kompliceret proces, må det imidlertid ikke forventes, at diffusionstallet er en konstant størrelse.

Til brug for praktiske fugttransportberegninger må det derfor være afgørende, at diffusionstallene udvælges så repræsentativt som muligt. Forsøgsdata må altså nøje gøre rede for forsøgsomstændighederne: partielle damptryk, luftfugtigheder, temperaturer samt materialetykkelse. Endelig er det væsentligt at kende materialets fugtindhold.

Diffusionstal for en lang række materialer findes offentliggjort (se f.eks. [3], [9], [27], [39], [49]).

Kun i sjældne tilfælde er der imidlertid gjort nøjere rede for forsøgsomstændighederne, hvorfor de i litteraturen angivne værdier som regel højst kan betragtes som retningsgivende.

Det skal endelig nævnes, at såvidt det vides, gælder de hidtil kendte diffusionstal kun for hygroskopiske fugtindhold. Byggematerialer forekommer imidlertid hyppigt med væsentlig større fugtindhold. Ikke mindst med henblik på vurdering af udtørningsmuligheder, fugtfare p.gr. af byggefugt o.s.v. er videre eksperimentelle undersøgelser på dette område stærkt tiltrængte.

3.1.1. Isoterme målinger

De gængse målinger af diffusionstallet er isoterme, idet prøvelegemet anbringes mellem to forskellige luftfugtigheder, men ved samme temperatur, ϑ .

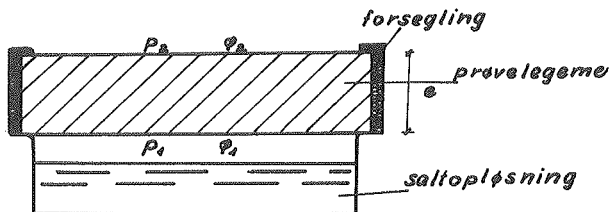


Fig. 19. "Cup"-metoden til bestemmelse af diffusionstallet.

Méthode isotherme pour la détermination de la perméabilité à la vapeur d'eau.

The permeability cup.

Almindeligt benyttet er "cup"-metoden (fig. 19), hvor materialet anbringes forseglet i en mindre beholder, hvori er anbragt en absorbent, en salt- eller svovlsyreopløsning eller rent vand. Det hele er dernæst placeret i luft af konstant temperatur og fugtighed, hvorefter vægttabet henholdsvis -forøgelsen pr. tidsenhed bestemmes.

ASTM (American Society for Testing Materials) angiver i sine standards E 96 - 53 T og C 355 - 54 T sådanne metoder til bestemmelse af vanddamptransporten i byggematerialer o.a.

Er materialet ikke-hygroskopisk, haves et lineært fald i de relative fugtigheder $\varphi_1 - \varphi_2$ og dermed også i de partielle damptryk: $\Delta p = p_1 - p_2 = (\varphi_1 - \varphi_2)p_s$, . Diffusionstallet fås altså umiddelbart af:

$$d = \frac{g}{\Delta p} e \quad (7) ,$$

hvor g er den gennemstrømmede dampmængde pr. tids- og arealenhed og e materialetykkelsen.

De fleste byggematerialer er imidlertid hygroskopiske, hvorfor fugtbevægelsen er mere kompliceret: medens den partielle trykgradient fortsat regnes lineær, indstiller sig tillige en fugtgradient i materialet, idet fugtindholdet u afhænger af den relative luftfugtighed, $u = f(\phi)$, givet ved materialets sorptionskurve.

Fugttransporten skyldes altså dels partialtrykgradienten dels fugtgradienten, der begge har samme retning.

Det vil oftest være umuligt at bestemme fugtfordelingen i materialet eksperimentelt, og selv om sorptionskurven yder teoretisk mulighed for beregning af fugtfordelingen, vil det sjældent være praktisk muligt bl.a. p.gr. af "sorptionshysteresen".

Forsøgsresultater angives altså normalt på grundlag af formelen (7), d.v.s. fugttransport p. gr. af fugtgradienten negligeres. Som følge heraf kan det dels forventes, at diffusionstallet afhænger af materialets fugtindhold, dels at der ikke er tale om fuldstændig proportionalitet mellem dampgennemtrængelighed og de reciprokke værdier af materialets tykkelse.

TVEIT [43] har målt diffusionstallene for et halvt hundrede materialer ved varierende luftfugtigheder. Resultaterne af disse målinger er givet i afhængighed af middeltallet af luftfugtigheden på de to sider af prøvelegemet. Fig. 20 viser et eksempel (blød træfiberplade).

For et tilsvarende materiale er diffusionstallene målt ved 20°C og på en materialetykkelse på 20 mm (egne målinger). Resultaterne heraf er ligeledes indtegnet. Det ses, at inden for forsøgsnøjagtigheden er det ikke muligt at skelne en evt. indflydelse på grund af forskellig tykkelse.

Fig. 21 viser et forslag til en (bedre) repræsentation af forsøgsresultaterne fra isoterme målinger.

De fundne diffusionstal afsættes i afhængighed af luftfugtigheden på den ene side af prøvelegemerne. Dernæst kan luft-

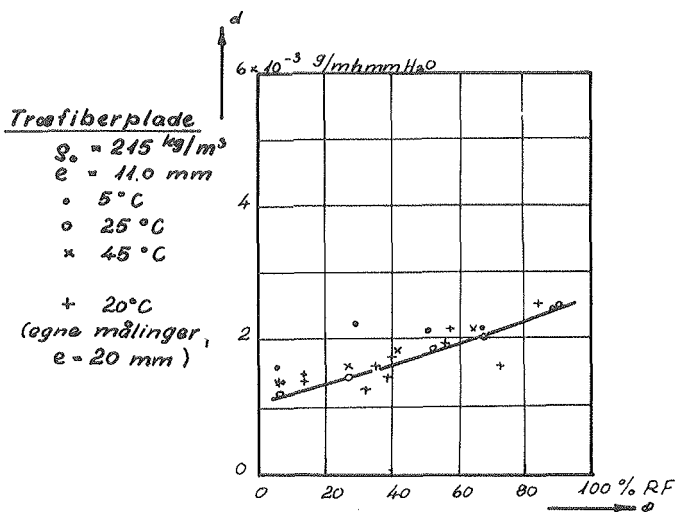


Fig. 20. Isoterme målinger af diffusionstallet (efter TVEIT [43]).

La perméabilité d'une plaque en fibre de bois; mesures isothermes.

Isothermal measurements of the permeability of wood fiber board.

fugtigheden på den anden side indtegnes som parameter.

Den egentlige afhængighed mellem diffusionstal og luftfugtighed fås nu som kurven, der forbinder tilsvarende parameter- og abscissepunkter.

Som eksempel er vist de ovennævnte forsøgsresultater for blød træfiberplade ved 20°C .

Temperaturens indflydelse ved isoterme målinger synes - bl.a. efter TVEIT's målinger - at være ret ringe. Ved ikke-hygroskopiske materialer, om hvilke man ved, at fugttransporten er ren vanddampdiffusion, kan man dog formentlig antage, at stigende temperatur betyder svagt stigende diffusionstal.

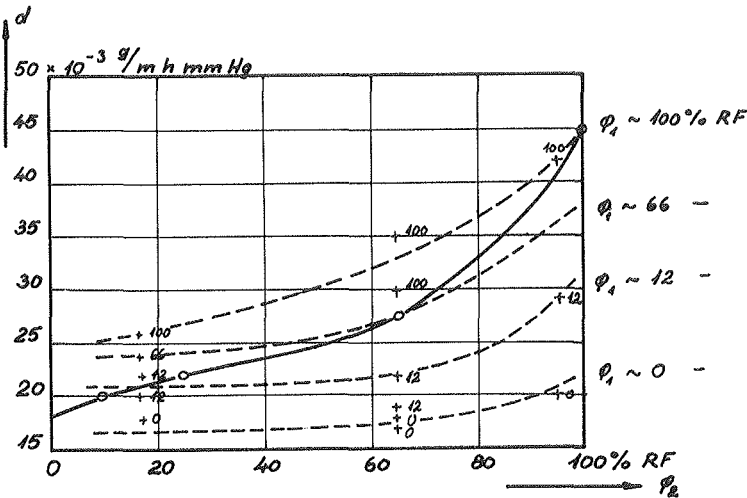


Fig. 21. Forslag til gengivelse af isoterme måleresultater. (Egne målinger på træfiberplade).

La perméabilité d'une plaque en fibre de bois, représenté en fonction de l'humidité relative des deux cotés.

The permeability of wood fibre board represented as a function of the relative humidity on the two sides.

3.1.2. Ikke-isoterme målinger

I dette tilfælde er både temperatur-, partialtryk- og fugtgradient normalt til stede. Disse kan være modsat eller ens rettede alt efter forholdene.

Såfremt diffusionstallet alene afhænger af den relative fugtighed samt evt. af temperaturen, skulle det være muligt ud fra isoterme målinger at vurdere det ikke-isoterme tilfælde.

Som tidligere omtalt (jvf. afsn. 2.3.5) kan det imidlertid formodes, at diffusionstallet - i hvert fald ved større fugtindhold - er væsentlig større end skønnet efter isoterme målinger.

Tages det endelig i betragtning, at fugtvandring normalt i praksis foregår under indflydelse af en temperaturgradient, indser man nødvendigheden af, at målinger foretages under disse betingelser.

Os bekendt foreligger der imidlertid kun ret få målinger, hvor materialet samtidig har været underkastet en temperaturgradient.

Fra 1942 stammer en række målinger på træfiberplade [19]. Vi gengiver de originale resultater i tabel 5.

Målingerne er udført i en "guarded hot box" og angiver derfor sammenhængen mellem fugt- og varmetransport. Samtlige forsøgsomstændigheder er forbilledligt gengivet.

Desværre er disse målinger ikke udført så systematisk, at vi har set os i stand til at konstatere eventuelle signifikante effekter.

Dog kan det konstateres, at ingen faktorer har en sådan indflydelse på diffusionstallet, at de bør tages i betragtning ved praktiske beregninger.

KRISCHER m.fl. [25] har udført målinger med dugpunkttemperatur ca. $3,5^{\circ}\text{C}$ på den kolde side og $80-90^{\circ}\text{C}$ lufttemperatur med varierende fugtighed på den varme side. Der er øjensynligt ikke ved disse forsøg bemærket nogen speciel indflydelse på gr. af temperaturgradienten.

Måleresultaterne angives som skematisk vist i fig. 22. Med damptrykket på den varme side som abscisse er afsat diffusionsmodstandsfaktoren ($\mu = D/d$, se afsn. 2.3.2.2). I samme figur er vist prøvelegemets middelfugtindhold.

Forlængelsen af μ -kurven til skæring med den lodrette akse kan siges at angive diffusionsmodstandsfaktoren for det tørre materiale, (μ_0), idet damptrykket på den kolde side er ganske lavt.

Tabel 5. Nogle amerikanske målinger på træfiberplade.
(0,795 in. fibre board, 17 lb/cubic feet).

| Number of Test | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Mean Temperature, Air to Air, Fahrenheit | 39,7 | 59,2 | 63,0 | 77,1 | 58,5 | 81,5 | 40,6 | 58,8 | 79,6 | 39,4 | 59,5 | 79,8 | 60,0 |
| Temperature, Hot Air, Fahrenheit | 70,3 | 92,4 | 106,0 | 109,0 | 89,2 | 109,1 | 71,0 | 89,0 | 109,2 | 72,3 | 90,0 | 110,0 | 109,6 |
| Temperature, Hot Surface, Fahrenheit | 61,6 | 82,0 | 93,4 | 99,4 | 79,8 | 100,8 | 61,2 | 79,3 | 100,1 | 61,9 | 80,3 | 100,8 | 94,6 |
| Temperature, Cold Air, Surface, Fahrenheit | 21,9 | 38,9 | 36,5 | 58,0 | 40,0 | 64,8 | 23,3 | 41,3 | 62,0 | 22,2 | 42,0 | 61,6 | 34,1 |
| Temperature, Cold Air, Fahrenheit | 9,1 | 25,9 | 19,9 | 45,1 | 27,8 | 53,8 | 10,1 | 28,6 | 49,9 | 6,5 | 29,0 | 49,5 | 10,3 |
| Heat Transfer, Total, Btu per sq ft (hr) | 18,37 | 20,61 | 27,23 | 20,44 | 20,57 | 20,38 | 19,40 | 21,25 | 23,59 | 20,62 | 21,87 | 24,85 | 36,62 |
| Heat Transfer, Vapor, Btu per sq ft (hr) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,79 | 3,27 | 1,80 | 3,20 | 4,92 | 2,18 | 3,61 | 5,94 | 6,13 |
| Heat Transfer, Thermal, Btu per sq ft (hr) | 18,37 | 20,61 | 27,23 | 20,44 | 18,78 | 17,11 | 17,60 | 18,05 | 18,67 | 18,44 | 18,26 | 18,91 | 30,49 |
| Hot Surface Coefficient, Btu per sq ft (hr)(deg) | 2,11 | 1,98 | 2,16 | 2,13 | 2,00 | 2,06 | 1,80 | 1,86 | 2,05 | 1,77 | 1,88 | 2,06 | 2,03 |
| Cold Surface Coefficient, Btu per sq ft (hr)(deg) | 1,44 | 1,58 | 1,63 | 1,58 | 1,54 | 1,56 | 1,33 | 1,42 | 1,54 | 1,17 | 1,40 | 1,56 | 1,28 |
| Transmittance, Btu per sq ft (hr)(deg) | 0,300 | 0,310 | 0,316 | 0,320 | 0,305 | 0,309 | 0,289 | 0,299 | 0,315 | 0,280 | 0,299 | 0,313 | 0,307 |
| Conductance, Btu per sq ft (hr)(deg) | 0,463 | 0,478 | 0,478 | 0,494 | 0,472 | 0,475 | 0,464 | 0,475 | 0,490 | 0,464 | 0,477 | 0,482 | 0,504 |
| Conductivity, (Btu) (in.) per (sq ft)(hr)(deg) | 0,368 | 0,380 | 0,380 | 0,393 | 0,375 | 0,378 | 0,369 | 0,378 | 0,390 | 0,369 | 0,379 | 0,383 | 0,401 |
| Mean Temperature, Surface to Surface, Fahrenheit | 41,8 | 60,5 | 65,0 | 78,7 | 58,5 | 82,8 | 42,3 | 60,3 | 81,1 | 42,1 | 61,2 | 81,2 | 64,4 |
| Moisture Content, Per cent by weight | 2,12 | 1,79 | 1,79 | 1,79 | 3,75 | 1,95 | 5,86 | 5,21 | 4,23 | 7,33 | 6,18 | 4,89 | 12,0 |
| Relative Humidity, Hot Air, Per Cent | | | | | 32,0 | 34,0 | 58,0 | 54,5 | 47,0 | 63,0 | 57,0 | 52,0 | 52,0 |
| Vapor Pressure, Hot Side, mmHg | | | | | 11,23 | 21,84 | 11,27 | 19,08 | 30,28 | 12,79 | 20,58 | 34,29 | 34,28 |
| Relative Humidity, Cold Air, Per Cent | | | | | 25,6 | 17,0 | 22,0 | 25,5 | 13,5 | 49,0 | 25,2 | 15,5 | 21,6 |
| Vapor Pressure, Cold Side, mmHg | | | | | 0,99 | 1,80 | 0,39 | 1,02 | 1,24 | 0,77 | 1,02 | 1,40 | 0,40 |
| Vapor Pressure Difference, mmHg | | | | | 10,24 | 20,04 | 10,88 | 18,06 | 29,04 | 12,02 | 19,56 | 32,89 | 33,88 |
| Vapor Transfer, Grains per sq ft (day) | | | | | 295,7 | 544,3 | 295,7 | 527,5 | 821,5 | 357,8 | 599,8 | 992,4 | 1041,7 |
| Permeability, Grains per sq ft (day)(mmHg) | | | | | 28,89 | 27,16 | 27,18 | 29,21 | 28,29 | 29,77 | 30,66 | 30,17 | 30,75 |

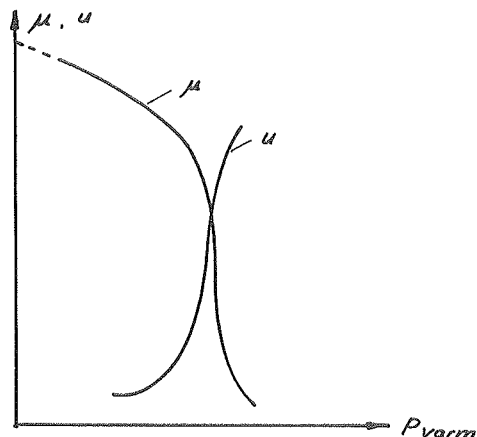


Fig. 22. Eksempel på diffusionsmodstandsfaktorens og fugtindholdets afhængighed af det partielle damptryk på den varme side (KRISCHER [25]).

Le "facteur de résistance à la diffusion" et le taux d'humidité en fonction de la pression partielle du côté chaud.

The diffusion resistance factor and the moisture content as functions of the partial vapour pressure on the warm side.

Til sammenligning med de målte diffusionstal angiver KRISCHER resultater fra egne og andres målinger ved sædvanlige isoterme metoder.

Inden for forsøgsnøjagtigheden - vi skønner, at den ikke overstiger 10 à 20% - findes for de fleste materialer en nogenlunde overensstemmelse med resultaterne fra de ikke-isoterme målinger.

KRISCHER's isoterme målinger er foretaget ved forskellige temperaturniveauer. Det synes imidlertid ikke muligt at afgøre dettes eventuelle indflydelse.

Det ses af fig. 22, at diffusionstallet stiger svagt (μ falder) ved let stigende fugtindhold indtil et vist kritisk fugtindhold, hvor diffusionstallet øges voldsomt.

Sammenlignes med materialernes sorptionskurver, som KRISCHER angav i samme arbejde, ser man, at dette "kritiske fugtindhold" formentlig ligger omkring grænsen for det hygroskopiske fugtindhold.

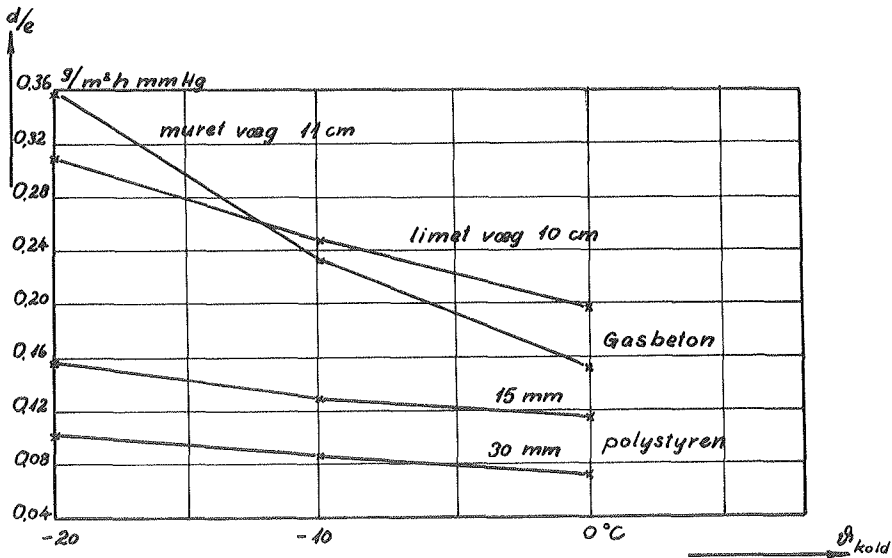


Fig. 23. Dampgennemtrængeligheden som funktion af temperaturen på den kolde side. (Målinger udført af Statens Byggeforskningsinstitut [48]).

La perméance de la vapeur d'eau en fonction de la température du côté froid. (Mesures de l'Institut de la Recherche du Bâtiment, Copenhague).

The permeance as a function of the temperature of the cold side. (Measurements of the Building Research Institute, Copenhagen).

Endelig bør omtales en række forsøg udført ved Statens Byggeforskningsinstitut [48]. Man har her - som led i et internordisk fugtforskningssamarbejde - målt diffusionstal for bl.a. spånplade, exp. polystyren og gasbeton. Målingerne er foretaget ved ca. 25°C og 54-66% RF, henholdsvis -20°C, -10°C, 0°C og ca. 90% RF.

Fig. 23 viser forsøgsresultaterne for polystyren og gasbeton i afhængighed af temperaturen på den kolde side.

Det ses, at større temperaturdifferens medfører større diffusionstal. Den gennemsnitlige lineære virkning på diffusionstallet er for den murede gasbetonvæg godt 4% pr. grad temperaturforskel, for den limede væg 2-3%/grad og for polystyren 1-2%/grad.

Fig. 24 antyder muligvis en semilogaritmisk sammenhæng mellem temperaturforskel og diffusionstal.

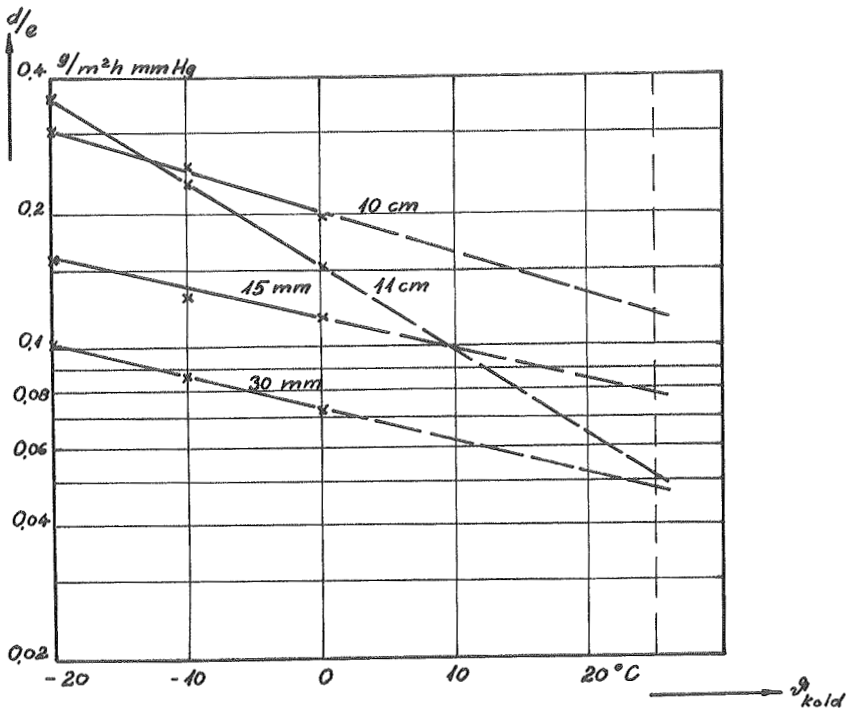


Fig. 24. Fig. 23 i semilogaritmisk afbildning.

Figure 23 en représentation semilogarithmique.

Figure 23 in a semi-logarithmical plot.

3.2. Kapillarledningstallet

Vanskeligheden i en nøjagtig bestemmelse af kapillarledningstallet skyldes dels, at kendskab til fugtfordelingen i materialet er nødvendig, dels at det ikke eksperimentelt er muligt at adskille damptransporten og væsketransporten.

LYKOW [30] og KRISCHER [27] angiver en række metoder, som ikke her skal refereres. Fra KRISCHER og MAHLER's [26] indgående målinger på tegl og gasbeton gengiver vi nedenfor i fig. 25 resultaterne.

Kapillarledningstallet må som tidligere nævnt være nul ved helt tørre materialer.

Det ses imidlertid, at korrigeres der ikke for fugttransporten i dampform (diffusionen), udviser kurven et minimum omkring det maximale, hygroskopiske fugtindhold ($u_{h,max}$).

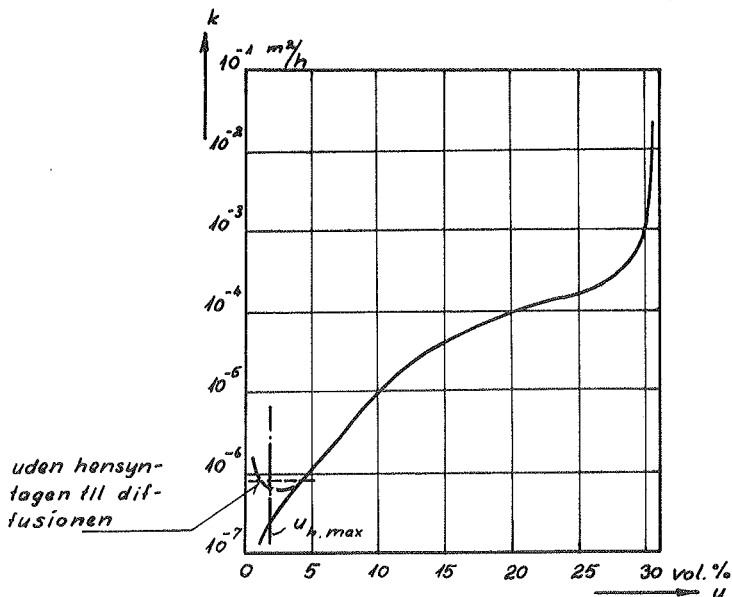


Fig. 25A. Kapillarledningstallet for tegl. (Efter KRISCHER [26].

La diffusivité capillaire de tuile.

The capillary diffusivity of tile.

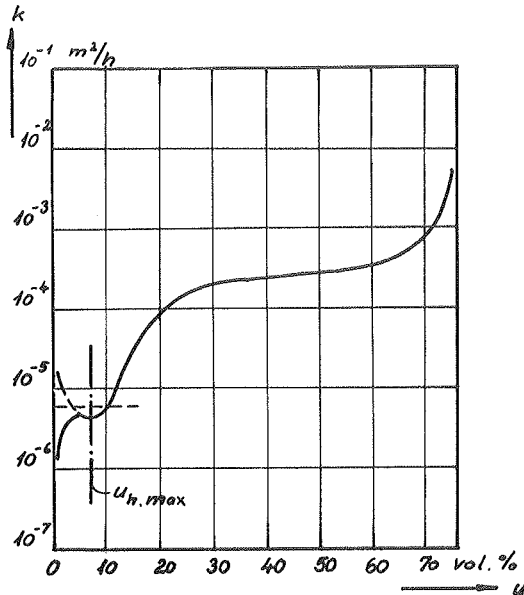


Fig. 25B. Kapillarledningstallet for gasbeton. (Efter KRISCHER [26]).

La diffusivité capillaire de béton cellulaire.

The capillary diffusivity of cellular concrete.

For de fugtindhold, der normalt forekommer i byggematerialer, kan man måske med nogen rimelighed regne med en konstant k -værdi (vist punkteret). Denne bør da imidlertid benævnes fugtledningstallet (jvf. [28]), da fugttransporten ved de lave fugtindhold hovedsageligt er en dampdiffusion.

HANSON [17] har benyttet en metode, der forekommer relativt simpel, hvorfor der kort skal redegøres for den.

Prøvelegemer underkastes en temperaturgradient. På den varme side hersker en konstant relativ fugtighed, mens prøve-

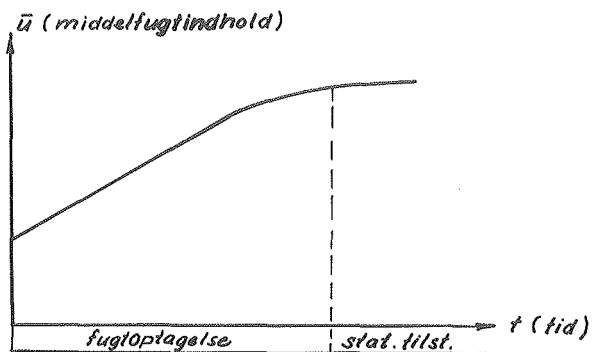


Fig. 26. Fugtindholdets forløb med kold side damptæt. (Efter HANSON [17]).

L'allure du taux d'humidité avec le coté froid étanche.

The increase of the moisture content with vapour-tight layer on the cold side.

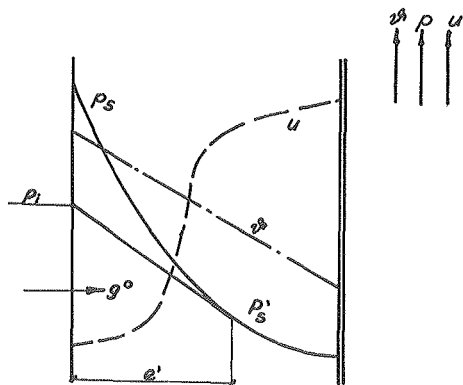


Fig. 27. Fugtfordeling og temperaturforløb. Damptrykforløb i begyndelsestilstanden. (HANSON [17]).

Répartition de l'humidité et allure de la température.

Pressions de vapeur en état initial.

Moisture and temperature distribution.

Vapour pressure pattern in the initial state.

legemets kolde side er forseglet damptæt. Prøvelegemets fugtoptagelse måles dernæst (fig. 26), indtil stationær tilstand er indtrådt. Dernæst bestemmes fugtfordelingen i materialet.

Fig. 27 viser eksempelvis den herved bestemte fugtfordeling, samt temperaturforløbet i prøvelegemet. På grundlag af temperaturfordelingen er kurven for de mættede damptryk optegnet.

Fugtledningstallet samt diffusionstallet kan nu bestemmes ud fra følgende betragtninger:

Grundligningen for fugttransporten er:

$$g = -d \frac{\partial p}{\partial x} - k \frac{\partial u}{\partial x}$$

Som det fremgår af figuren, er fugtgradienten mod den varme side ~ 0 , hvorfor fugtoptagelsen i begyndelsen kan beskrives ved ligningen:

$$g^0 = -d \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^0$$

g^0 bestemmes af fig. 26, idet $g^0 = \frac{\partial u}{\partial t} \cdot e$, hvor e er tykkelsen af prøvelegemet.

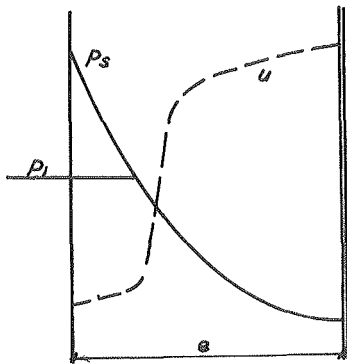


Fig. 28. Damptrykforløb i sluttilstanden. (HANSON [17]).

Pressions de vapeur en état final.

Vapour pressure pattern in the final state.

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)^0 \text{ fås af fig. 27, idet: } \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)^0 = \frac{p_i - p_s}{e}$$

Dernæst er altså diffusionstallet d bestemt.

I den stationære tilstand må det gælde:

$$d \frac{\partial p}{\partial x} + k \frac{\partial u}{\partial x} = 0,$$

og damptrykkurverne må forløbe som vist i fig. 28.

Med kendskab til u - og p -kurvernes forløb samt til diffusionstallet d kan k -værdien bestemmes.

(Det her omtalte eksempel, hvor fugt kondenserer i den kolde side af et materiale, er nylig behandlet udførligt af VOS [46].

Ud fra visse forudsætninger angives heri formler til beregning af fugtoptagelsen og tidspunktet for ligevægts indtræden. De grundlæggende betragtninger svarer imidlertid ganske til HANSON's fra 1958.)

3.3. Udtørningsforløbet

Med kendskab til udtørningsforløbet under konstante isoterme forhold kan foretages en skønsmæssig vurdering af størrelsesordenen af såvel diffusionstallet som fugtledningstallet.

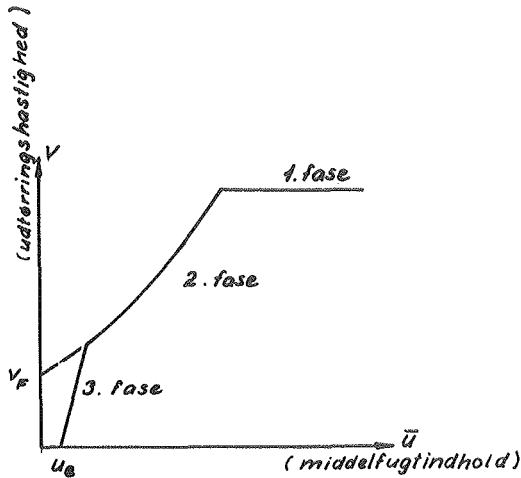


Fig. 29. Udtørningsforløbets tre faser

Les trois phases de l'allure de séchage.

The three phases of the drying process.

Udtørningsforløbet består af 3 faser (fig. 29): I 1. fase er udtørningshastigheden konstant; kapillarkræfterne holder til stadighed overfladen fugtig, og fordampningen foregår som fra en fri vandoverflade.

I 2. fase foregår fugttransporten som en kombination af væske- og damptransport med stigende andel af den sidste, og udtørningshastigheden vil konvergere mod en "sluthastighed" V_F , hvor

$$V_F = \frac{p_s - p_i}{d} e$$

idet d er diffusionstallet, e er materialets tykkelse (ved énsidig udtørring, $2e$ ved dobbeltsidig) og p_s mætningstryk-
ket ved den herskende temperatur. p_i er det partielle damp-
tryk ved materialets overflade.

Ved hygroskopiske materialer indtræder imidlertid en 3. fase,
hvor materialet under ren dampdiffusion indstiller sig med
sit hygroskopiske ligevægtsfugtindhold (u_e). Det vil såle-
des være forlængelsen af 2. fase, der benyttes til bestem-
melse af v_F (fig. 29) og hermed af diffusionstallet.

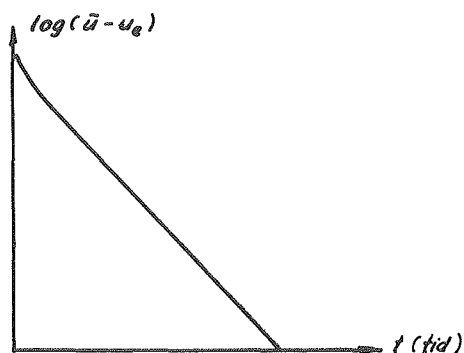


Fig. 30.

Udtørringsforløbets
slutfaser semilogarit-
misk afbildet.

Représentation semi-
logarithmique des
dernières phases
du séchage.

The final phases of
the drying process in
a semi-logarithmical plot.

I den udstrækning, hvor fugtledningstallet kan regnes nogen-
lunde konstant, vil udtørringsforløbet kunne gengives i en
semilogaritmisk kurve, som vist i fig. 30. Hældningen af
den rette linie er udtryk for fugtledningstallets størrelse.

Ovenfor er synspunkterne vedr. udtørring af byggematerialer
kun lige berørt. Nærmere behandling af dette emne findes
bl.a. hos KRISCHER [27] og LYKOW [30]. En mere praktisk be-
tonet behandling er af forfatteren givet i [28].

4. PRAKTISKE BEREGNINGSMETODER

4.1. Indledning

Efter gennemgangen af teorien for de forskellige former for fugttransport i byggematerialer skal i det følgende omtales nogle metoder til beregning af fugttransporten i bygningsdele.

Med grundlag i vor nuværende viden er der kun mulighed for beregning af fugttransporten i dampform, d.v.s. fugttransporten fra luft gennem materialet og til luft samt fugttransporten fra luften og til materialet (fugtakkumulering i materialet). Der er med andre ord mulighed for beregning af den gennemdiffunderende dampmængde samt den dampmængde, der kondenserer i materialet.

Fugttransport i væskeform ("kapillarsugning"), lader sig indtil videre ikke beregne kvantitativt, hvoraf bl.a. følger, at fugtfordelingen i et byggemateriale, hvori der foregår kondensation, sjældent lader sig beregne. Som andet eksempel kan nævnes, at medens den mængde, der kondenserer ved overfladekondensation, kan beregnes (se f.eks. CAMMERER [3] og FISCHER [10]) vil det i det højeste kun være muligt at skønne, hvor stor en del af denne, der trænger ind i materialet (materialets kapillarsugningsegenskaber).

4.2. Dampdiffusion i bygningsdele under stationære forhold

Først betragtes dampdiffusionen under stationære hygrottermiske forhold, d.v.s. materialet antages at have opnået ligevægt såvel hvad angår temperaturer som herskende damptryk.

4.2.1. Homogen væg uden fugtaflejring

Først betragtes det simple, teoretiske tilfælde, hvor væggen består af et tørt, homogent og ikke-hygroskopisk materiale (fig. 31).

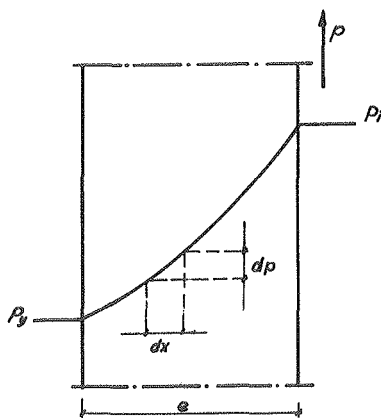


Fig. 31.

Bestemmelse af damptrykforløbet i en homogen væg.

La détermination des pressions partielles dans une paroi homogène.

Determination of the vapour pressure pattern in a homogeneous wall.

Lad væggen adskille to atmosfærer med de partielle damptryk p_i og p_y , hvor $p_i > p_y$.

Trykdifferensen vil betyde en vanddampbevægelse (hovedsageligt) ved diffusion gennem væggen.

Diffusionsfænomenet følger, så længe der ikke aflejres fugt i væggen, Fick's eller Stefan's lov, der - som det er påvist i det foregående - tilnærmet kan udtrykkes:

$$g = -d \frac{\partial p}{\partial x} \quad (8) \quad [\text{f.eks. i } g/m^2h]$$

eller: den vanddampmængde, der pr. tidsenhed diffunderer gennem en arealenhed af væggen, er proportional med trykgradienten for de partielle damptryk $\partial p/\partial x$.

d er en materialekarakteristik, der kaldes diffusionstallet eller vanddamppermeabilitetskoefficienten. Foreløbig regnes den konstant.

Regnes damptryk i mmHg, tid i h og længde i m, har d enheden $g/mhmmHg$. Denne enhed har vi fundet udmærket anvendelig ved alm. diffusionsberegninger, hvorfor den anvendes i det følgende. Andre enheder vil blive omtalt i et afsluttende afsnit.

Hvor materialetykkelsen er dårligt defineret som ved f.eks. tagpapper eller visse isoleringsmaterialer kan man angive forholdet d/e udtrykt i f.eks. g/m^2hmmHg , der kan kaldes dampgennemtrængeligheden (permeance) eller det reciprokke: $W = e/d$ i $m^2hmmHg/g(pam)$, diffusionsmodstanden.

Da det antages, at der ikke forekommer fugtaflejring og at materialet er tørt, må g forblive konstant. Heraf følger, at $\partial p/\partial x = \text{const.}$, d.v.s. damptrykket aftager lineært gennem væggen fra p_i til p_y .

I dette tilfælde bestemmes altså forløbet af de partielle damptryk og heraf den gennemdiffunderende fugtmængde ganske simpelt ud fra ligningen:

$$g = d \frac{p_i - p_y}{e} = \frac{\Delta p}{W}$$

Dampovergangsmodstandene vil som regel være af så lille størrelsesorden ($0,1$ à $0,2 m^2hmmHg/g$) i forhold til de øvrige indgående diffusionsmodstande, at man kan se bort fra dem.

(Nærmere angående overgangsmodstanden: se f.eks. [3] og [28]).

4.2.2. Sammensat væg uden fugtaflejring

Formlen (8) svarer fuldstændig til den analoge for varme-transmission ($\lambda \sim d$ og $\vartheta \sim p$).

Idet der hernæst blot kan refereres til de tilsvarende formler i varmetransmissionsteorien, må følgende altså gælde for den sammensatte væg:

Den samlede diffusionsmodstand: $W_{\text{tot}} = \sum W_n = \sum \frac{e_n}{d_n}$,

hvor W_n er diffusionsmodstanden af det n'te lag ($\text{m}^2 \text{hmmHg/g}$)

e_n - tykkelsen - - - - (m)

og d_n - diffusionstallet - - - - (g/mhmmHg)

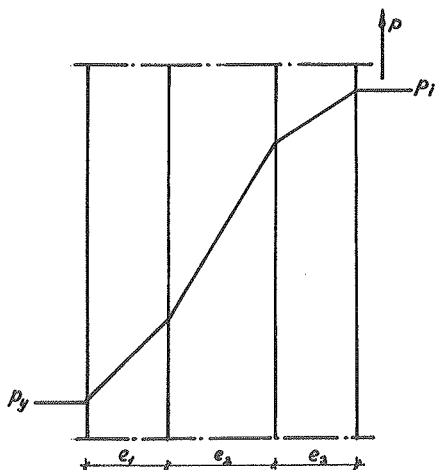


Fig. 32A

Damptrykforløbet
i en sammensat byg-
ningsdel.

Pressions partielles
dans une paroi com-
posée.

The vapour pressure
pattern in a multi-
layer wall.

For damptrykforløbet i en sammensat bygningsdel må endvidere gælde:

$$p_x = p_i - \frac{p_i - p_y}{W_{\text{tot}}} \sum_1^x W_x \quad (\text{fig. 32A}) \quad (9)$$

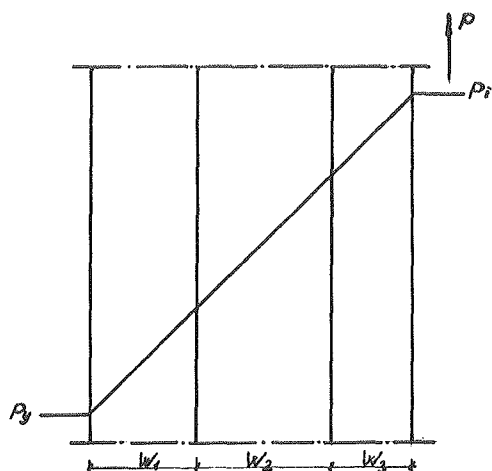


Fig. 32B.

Damptrykforløbet i
en sammensat byg-
ningsdel.

Pressions partielles
dans une paroi com-
posée.

The vapour pressure
pattern in a multi-
layer wall.

Af formelen følger, at afbildes væggen med diffusionsmodstan-
den i stedet for tykkelsen som abscisse, vil damptrykforlø-
bet afbildes i en ret linie (fig. 32B).

4.2.3. Homogen væg med fugtaflejring (fig. 33)

Damptrykket må altid opfylde betingelsen: $p \leq p_s$, hvor p_s er
de mættede dampes tryk.

I det foregående tilfælde, hvor fugtaflejring ikke forekom,
gjaldt det yderligere: $p < p_s$.

Da materialet antages tørt, og fugtigheds"kilder" altså ikke
forekommer, må det endvidere gælde, at diffusionsintensiteten
kun kan forblive konstant eller aftage, hvilket udtrykkes
 $\partial g / \partial x \leq 0$.

Sammenlignes med det foregående, kan betingelsen udtrykkes
mere præcist:

$$p < p_s \Rightarrow \partial g / \partial x = 0$$

$$\text{og} \quad p = p_s \Rightarrow \partial g / \partial x < 0,$$

hvilket medfører fugtaflejring.

ingen fugtudskillelse; i zonen $P' - P''$ er der kondensation, idet $p = p_s$ og $\partial g / \partial x < 0$, og endelig falder damptrykket retlinet på stykket $P'' - p_y$, og ingen fugtudskillelse finder sted.

Den udskilte fugtmængde bestemmes af differensen mellem den ind- og uddiffunderende dampmængde:

$$G = d \frac{p_i - P'}{x_1} - d \frac{P'' - p_y}{x_2} = \frac{p_i - P'}{w_1} - \frac{P'' - p_y}{w_2}$$

Ovenfor er der ingen forudsætninger gjort i henseende til, om fugten udskilles som vand eller som is - altså om temperaturerne er over eller under 0°C .

Imidlertid er det kendt, at den mættede damptrykkurve har et knæpunkt ved overgangen vand-is. (fig. 1).

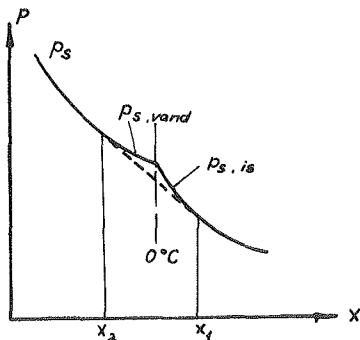


Fig. 34.

Damptrykforløbet i området omkring 0°C . (Efter GLASER).

Pressions partiellies autour de 0°C .

Vapour pressure pattern around 0°C .

I det foregående blev vist, at den reelle damptrykkurve af kontinuitetsgrunde aldrig kan udvise knæpunkter. Det indses derfor, at der i området med temperatur på 0°C aldrig vil forekomme fugtudskillelse. Thi selv under forhold, hvor den reelle damptrykkurve er sammenfaldende med mætningskurverne over og under 0°C , vil det gælde, at $p < p_s$, idet den reelle damptrykkurve går tangentielt til mætningskurverne (jvf. fig. 34).

De til x_1 og x_2 svarende temperaturer er uafhængige af materialets egenskaber. GLASER ["Kältetechnik" 12/1958 pag.386] beregnede dem til:

$$\vartheta_1 = -0,82^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_2 = +0,95^\circ\text{C}$$

4.2.4. Sammensat væg med fugtaflejring

Sammensatte vægge kan behandles analogt med homogene, idet man med kendskab til de enkelte materials diffusionstal kan optegne de partielle damptryks variation i de enkelte lag efter formlen (9).

Skæres p_s -kurven, fås den reelle damptrykvariation ved tangenterne til p_s -kurven.

Væsentlige lettelser opnås dog i dette tilfælde, når damptrykkene optegnes i afhængighed af diffusionsmodstandene. Denne grafiske beregningsmetode omtales nedenfor.

4.2.5. Beregning af den akkumulerede fugtmængde

Beregninger vedr. kondensationsfare m.v. udføres normalt lettest ved hjælp af den grafiske metode. Denne blev gjort almindelig kendt af GLASER i forbindelse med en stor og indgående redegørelse over diffusionsfænomenerne [12, 13, 14, 15].

Vi henviser ikke mindst til [12] og [14] hvor teoriens overensstemmelse med SCHÄCKE's [37] forsøgsresultater er påvist.

En analytisk metode udledt på basis af sammenhængen mellem vanddampdiffusion og varmemestrøm kan evt. tillige finde nogen anvendelse, spec. ved bygningsdele bestående af lagdelte materialer.

4.2.5.1. Grafisk metode

Princippet (fig. 35) i metoden fremgår af det foregående. Temperaturforløbet (ϑ) beregnes og optegnes i afhængighed af de enkelte lags diffusionsmodstande $W = e/d$ ($m^2 \text{ hmmHg/g}$).

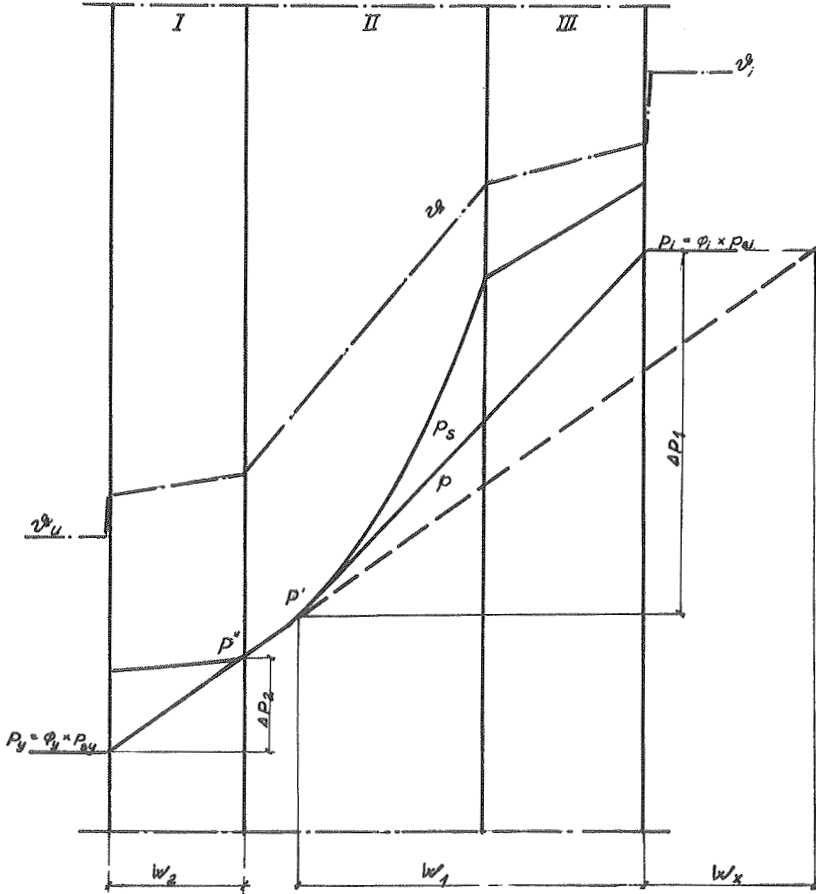


Fig. 35. Grafisk bestemmelse af udskilt fugtmængde og nødvendig dampspærre.

Détermination graphique de la quantité d'humidité déposée et la barrière de vapeur nécessaire.

Graphical determination of the condensed moisture quantity and the necessary vapour barrier.

Herefter kan kurven for de mættede dampes tryk (p_s) indtegnes ved hjælp af en damptryktabel. Den reelle damptrykkurve fås endelig som tangenterne til p_s fra p_i og p_y eller (hvis kondensation ikke forekommer) som forbindelseslinien $p_i - p_y$. Den akkumulerede fugtmængde fås nu af forskellen mellem tangenthældningerne:

$$G = g_i - g_u = \frac{(\Delta p)_1}{(W)_1} - \frac{(\Delta p)_2}{(W)_2}$$

Kondensation i en konstruktion kan undgås, hvis der anordnes en dampspærre (el. dampbremse) på den varme side. Ved hjælp af damptrykdigrammet kan den nødvendige størrelse (W_x) af en sådan beregnes.

Idet det erindres, at damptrykkurven skal være retlinet, hvis fugtudskillelsen skal være nul, fremgår konstruktionen af fig. 35. Linien $p_y - P'$ forlænges til skæring med p_i .

4.2.5.2. Analytisk metode

Ligningen (8) kan omskrives på følgende måde:

$$g = -d \frac{\partial p}{\partial x} = -d \frac{\partial p}{\partial \vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial x} = \frac{d}{\lambda} \frac{\partial p}{\partial \vartheta} Q,$$

hvor ϑ angiver temperaturen i °C, λ er materialets varmeledningstal (kcal/mh deg), og Q varmestrommen gennem bygningsdelen (kcal/m²h).

Ved kondensation gælder: $g = \frac{d}{\lambda} Q \frac{\partial p_s}{\partial \vartheta}$, og specielt denne formel kan være nyttig ved lagdelte materialer, hvor kondensation forekommer på skillefladen mellem lagene.

$\partial p_s / \partial \vartheta$ er angivet i kurveform på fig. 16 samt i tabel 6. Værdierne af $\partial p_s / \partial \vartheta$ er beregnet ved hjælp af de tidligere omtalte tilnærmede 3. grads polynomier for p_s (afsn. 2.1.1).

Tabel 6. Vanddamps mætningstryk, $p_s = f(\vartheta)$ samt
den første og anden afledede.

| $\vartheta (^{\circ}\text{C})$ | p_s mmHg | $\partial p_s / \partial \vartheta$ mmHg/deg | $\partial^2 p_s / \partial \vartheta^2$ mmHg/deg ² | $\vartheta (^{\circ}\text{C})$ | p_s mmHg | $\partial p_s / \partial \vartheta$ mmHg/deg | $\partial^2 p_s / \partial \vartheta^2$ mmHg/deg ² |
|--------------------------------|---------------|---|--|--------------------------------|---------------|---|--|
| 0 | 4,58 | 0,352 | - | 0 | 4,58 | 0,352 | - |
| +1 | 4,93 | 0,361 | 0,019 | -1 | 4,22 | 0,345 | 0,014 |
| +2 | 5,30 | 0,381 | 0,021 | -2 | 3,89 | 0,326 | 0,023 |
| +3 | 5,69 | 0,403 | 0,023 | -3 | 3,57 | 0,304 | 0,022 |
| +4 | 6,11 | 0,427 | 0,025 | -4 | 3,28 | 0,285 | 0,021 |
| +5 | 6,55 | 0,453 | 0,027 | -5 | 3,01 | 0,262 | 0,020 |
| +6 | 7,01 | 0,481 | 0,029 | -6 | 2,75 | 0,242 | 0,019 |
| +7 | 7,51 | 0,511 | 0,031 | -7 | 2,52 | 0,224 | 0,018 |
| +8 | 8,04 | 0,543 | 0,033 | -8 | 2,31 | 0,206 | 0,017 |
| +9 | 8,60 | 0,577 | 0,035 | -9 | 2,11 | 0,190 | 0,016 |
| +10 | 9,11 | 0,613 | 0,037 | -10 | 1,93 | 0,174 | 0,015 |
| +11 | 9,82 | 0,651 | 0,039 | -11 | 1,76 | 0,160 | 0,016 |
| +12 | 10,49 | 0,691 | 0,041 | -12 | 1,61 | 0,146 | 0,013 |
| +13 | 11,21 | 0,733 | 0,043 | -13 | 1,47 | 0,134 | 0,012 |
| +14 | 11,96 | 0,777 | 0,045 | -14 | 1,34 | 0,122 | 0,011 |
| +15 | 12,76 | 0,8235 | 0,047 | -15 | 1,22 | 0,112 | 0,010 |
| +16 | 13,61 | 0,871 | 0,049 | -16 | 1,11 | 0,102 | 0,009 |
| +17 | 14,50 | 0,921 | 0,051 | -17 | 1,02 | 0,094 | 0,008 |
| +18 | 15,45 | 0,973 | 0,053 | -18 | 0,93 | 0,086 | 0,007 |
| +19 | 16,45 | 1,027 | 0,055 | -19 | 0,84 | 0,080 | 0,006 |
| +20 | 17,51 | - | - | -20 | 0,77 | - | - |

[Efter:[11]].

For den kondenserede fugtmængde på skillefladen mellem to materialer gælder:

$$G = Q (\partial p_s / \partial \vartheta)_{\vartheta_s} \left[\left(\frac{d}{\lambda} \right)_1 - \left(\frac{d}{\lambda} \right)_2 \right]$$

Det ses altså, at kondensation forekommer, hvis $\left(\frac{d}{\lambda} \right)_1 > \left(\frac{d}{\lambda} \right)_2$

Forholdet $\frac{d}{\lambda}$ kan kaldes "beliggenhedsfaktoren" (jvf. tysk "Lagefaktor" hos NEUFERT [33]), og om denne gælder det altså, at den skal blive større udefter (mod væggens kolde side), hvis kondensation skal undgås.

Differentieres ligning (8), fås intensiteten af den eventuelt udskilte fugtmængde eller fugtmængden pr. rum- og tidsenhed.

$$\frac{\partial g}{\partial x} = d \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (\text{f.eks. i g/m}^3\text{h})$$

Ved kondensation haves:

$$\frac{\partial g}{\partial x} = d \frac{\partial^2 p_s}{\partial x^2} = d \frac{\partial^2 p_s}{\partial \vartheta^2} \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right)^2 + d \frac{\partial p_s}{\partial \vartheta} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2}$$

Da temperaturforløbet i samme materiale overalt i vore beregninger regnes retlinet, er $\partial^2 \vartheta / \partial x^2 = 0$, hvorfor

$$\frac{\partial g}{\partial x} = d \frac{\partial^2 p_s}{\partial \vartheta^2} \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right)^2 = \frac{d}{\lambda^2} Q^2 \frac{\partial^2 p_s}{\partial \vartheta^2}$$

Den anden afledede af mætningstrykket fremgår af tabel 6.

4.2.6. Diffusionstal

Idet vi iøvrigt henviser til den nærmere omtale af diffusions-
tallet og målingen af dette, gengives nedenfor en række vej-
ledende diffusionstal (i g/mhmmHg). (Tabel 7).

Tabel 7. Diffusionstal for nogle byggematerialer

| | rumvægt (kg/m ³) | diffusionstal (10 ⁻³ ·g/mhmmHg) |
|--------------------|---------------------------------|---|
| NATURSTEN | | |
| kalksandsten | 1700-2400 | 9 |
| | 1300-1400 | 18 |
| TEGL | | |
| mursten, massive | 1700-1900 | 9-12 |
| mursten, mangelhul | 1200-1600 | 15-30 |
| murværk | 1360 | 13 |
| murværk | 1530 | 9 |
| PUDSMØRTEL | | |
| kalk | 1800 | 9 |
| kalkcement | 1800-2000 | 5-9 |
| cement | 2000-2100 | 3,6-6 |
| MUREMØRTEL | | |
| kalk | 1800 | 9 |
| kalkcement | 2000 | 2 |
| cement | 2000-2100 | 1,1-2,3 |
| ASBESTCEMENT | | |
| | 750 | 5 |
| | 1700 | 2,3 |
| | 1900 | 1,5 |
| GIPS | | |
| støbt | 1200 | 13-15 |
| plader | 1400 | 15 |
| MINERALULD | | |
| | 10-300 | 55-75 |

fortsættes

Tabel 7 (fortsat)

| <u>Diffusionstal for nogle byggematerialer</u> | | |
|--|---------------------------------------|--|
| | rumvægt (kg/m^3) | diffusionstal ($10^{-3} \cdot \text{g}/\text{mHmHg}$) |
| BETON | | |
| alm.grovbeton | 2200-2500 | 2,6-3 |
| beton m.lette tilslag | 700-1500 | 9-45 |
| cellebeton | 500-800 | 9-45 |
| træbeton | 400-600 | 7-30 |
| PLASTSKUM | | |
| polystyrenskum | 10 | 3-4,5 |
| - | 15 | 2-3 |
| - | 20 | 1-2 |
| - | 30 | 0,8-1,2 |
| ("Roofmate") | 40 | 0,43 |
| (-) | 60 | 0,25-0,70 |
| phenolskum | 35-100 | 1,6-18 |
| | 230 | 0,40 |
| polyurethan | 25-150 | 1,5-15 |
| polyvinylchlorid | 25-60 | 0,07-0,45 |
| TRÆ OG TRÆFIBERPLADER | | |
| bøg, u = 10 vægt% | ca.600 | 1,3 |
| - 15 - | | 8 |
| - 20 - | | 11 |
| - 30 - | | 45 |
| - 40 - | | 60 |
| - 50 - | | 47 |
| gran, u = 4 vægt% | ca.400 | 0,40 |
| - 6 - | | 0,55 |
| - - | | 0,80 |
| træfiberplader | 500 | 6,5-15 |
| | 400 | 18-30 |
| | 300 | 30 |
| KORK | 130-300 | 3-18 |

Ved udarbejdelsen af tabellen har følgende kilder været benyttet: EICHLER [9], KRISCHER [27], CAMMERER [3] og SEIFFERT [38]. Endvidere er for skumplasts vedkommende måleresultater fra "C.S.T.B.", Paris benyttet.

Tabellen kan tjene til illustration af størrelsesordenen samt variationen på diffusionstallene.

4.2.7. Terminologi og dimensioner

Især tysk litteratur har i de senere år behandlet fugtdiffusionen og dennes beregning [GLASER, CAMMERER, SEIFFERT, MORITZ, EICHLER].

Da vi i denne redegørelse har benyttet symboler og dimensioner, der afviger fra sædvanlig tysk praksis, skal der kort redegøres for de af ovennævnte forfattere anvendte formler og dimensioner (jvf. iøvrigt afsnit 2.3.2.2.).

Grundligningen er: $g = \frac{D}{\mu R_d \theta e} (p_i - p_y) \quad (10),$

der er en forenkling af Stefan's lov, gældende når de partiellem damptryk er små over for atmosfæretrykket.

g er den diffunderende dampmængde, udtrykt i $\text{kg/m}^2\text{h}$,

R_d gaskonstanten for vanddamp ($R_d = 47,1 \text{ mkg/kp}^\circ\text{K}$),

θ den absolutte temperaturs gennemsnitsværdi,

e lagtykkelsen og

D diffusionstallet for vanddamp i stillestående luftlag.

Endelig er μ materialets diffusionsmodstandsfaktor (i rent tal), som angiver, hvor meget større diffusionsmodstanden er i materialet end for et luftlag af samme tykkelse og ved samme temperatur.

GLASER beregner diffusionsmodstanden under hensyn til middeltemperaturen i de enkelte lag, mens CAMMERER udregner modstanden efter formlen: $160.000 \cdot \mu \cdot e = W$. Fejlen ved at se bort fra temperaturafhængigheden angives at være op til $\pm 6\%$ i intervallet $-20^\circ\text{C} < \theta < 20^\circ\text{C}$.

Efter det opstillede enhedssystem angives diffusionsmodstanden i timer, hvilket dog synes en noget ejendommelig enhed, og den er da også formelt forkert men fremkommer ved ækvivalering af enheden for kraft: kp med masseenheden kg .

Vort enhedssystem^{*)} synes altså - dels på grund af den store unøjagtighed, hvormed diffusionstallet normalt er kendt (se tabellen ovenfor), dels ved sin direkte analogi til termiske beregninger - lettere anvendeligt ved praktiske (overslags)-beregninger.

Sammenhængen mellem diffusionsmodstandsfaktorer og diffusions-tal kan fås af formlen:

$$d = D/\mu \quad (\text{g/mhmmHg}) ,$$

hvor diffusionstallet D for luft kan sættes til 0,09 g/mhmmHg.

4.2.8. Beregningsmetodens begrænsninger

Ovenfor er i korte træk gjort rede for beregningsmetoderne for diffusionsfænomenerne i byggematerialer. Beregningerne er anvendelige i en række tilfælde såsom: bestemmelse af nødvendig dampspærre, vurdering af kondensrisiko, hvor en sådan må undgås, og - i visse tilfælde - ved beregning af maksimalt kondenserede vandmængder.

Ved anvendelsen bør man dog altid have sig metodens forudsætninger for øje, hvorfor disse kort skal gennemgås:

1) Tørre materialer. Mange byggematerialer indeholder imidlertid byggefugt, d.v.s. et over-hygroskopisk fugtindhold, der enten skyldes fabrikationen (betonprodukter, mørtel...) eller vejrliget under byggeperioden.

Hvorledes den beskrevne beregningsmetode for diffusionsfænomenerne undertiden kan anvendes i dette tilfælde, er omtalt nedenfor under "Våde materialer".

Endvidere er de fleste forekommende byggematerialer hygrosko-

^{*)} Ved indførelse af det internationale enhedssystem ("SI") vil det formentlig være en fordel at indføre trykenheden "mbar" ($\sim 100 \text{ N/m}^2 = 0,75 \text{ mmHg}$) i diffusionsberegningerne samt bibeholde de øvrige enheder. Det indførte beregnings-system vil kunne benyttes uændret, og størrelsesordenen af diffusionstal m.v. forbliver den samme.

piske, d.v.s. indeholder en vis fugtmængde afhængig af den omgivende luftfugtighed. Er materialet anbragt mellem forskellige luftfugtigheder, vil der altså ved siden af den "rene" diffusion foregå en fugttransport p.gr. af hygroskopiciteten. Denne fugttransport hænger nøje sammen med en anden forudsætning:

2) Ingen kapillaritet. Fugttransport i porøse materialer vil sjældent være ren diffusion. Den vil overlejres af en kapillartransport og det i jo højere grad, jo fugtigere materialet er.

Ved aflejring af fugtighed skabes en uligevægt i fugtkoncentrationen, og denne fugtgradient vil medføre en fugttransport i væskeform fra højere fugtindhold mod lavere.

3) Stationære forhold. Metoden forudsætter stationære hygrotermiske forhold. Men såvel indendørs- som udendørsforholdene varierer, og temperaturmæssigt influerer dette på væggen, jo mere, jo lettere den er.

Endvidere bør nævnes væggenes fugtkapacitet. Selv med konstante, ydre forhold vil fugtkapaciteten medføre en ikke helt negligabel indsvingningstid, inden stationære forhold opnås.

Vi skal i det følgende vende tilbage til dette problem.

Det fremgår af de ovenfor nævnte forudsætninger, at jo mindre hygroskopisk materialet er, jo bedre overensstemmelse må forventes mellem beregning og faktiske forhold.

Drejer det sig om konstatering af evt. kondensfare og dennes placering, vil teorien formentlig fuldt ud kunne anvendes; ved beregning af fugtakkumulationen samt fugtfordelingen må et rent kvalitativt skøn over det eller de pågældende materials kapillære egenskaber imidlertid afgøre teoriens anvendelighed.

4.2.9. Våde materialer

Ved "våde materialer" vil vi her forstå materialer med et sådant fugtindhold, at dette overskrider det hygroskopiske.

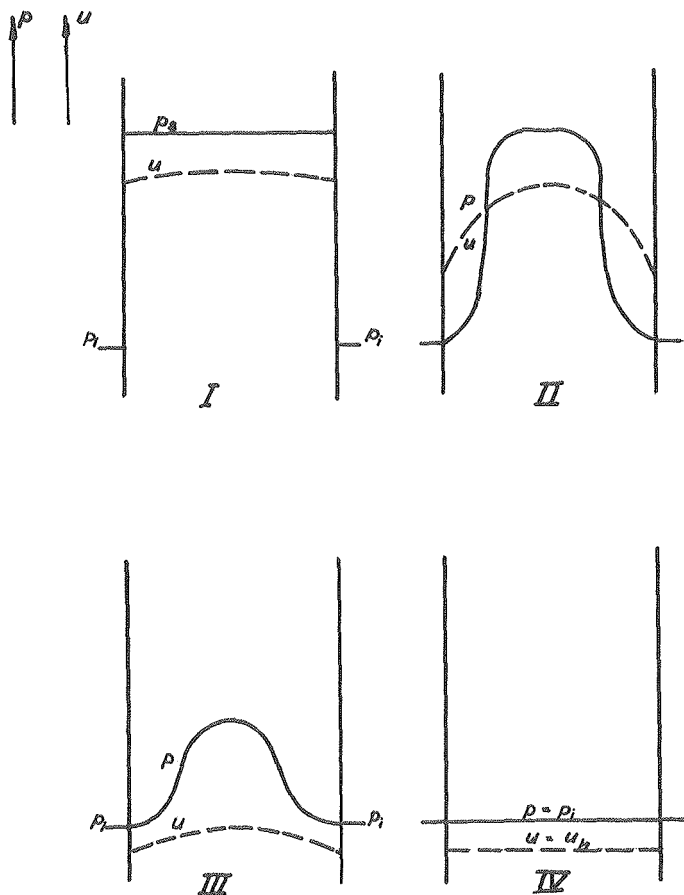


Fig. 36. Udtørningsforløb i en homogen mur.

Le séchage d'un mur homogène.

The drying-out of a homogeneous wall.

I disse vil damptrykforløbet ikke være bestemt af de ydre partielle damptryk, men svare til de mættede dampes tryk, p_s , ved de herskende temperaturer.

Eksempelvis vises damptrykforløbene i en mur under udtørring (fig. 36): Ved I er alle lag "våde"; med tiden tørrer først de yderste lag ud til fugtindhold under det maksimale hygroskopiske, og endelig ved IV har muren i hele materialetykkelsen indstillet sig i hygroskopisk ligevægt, u_h , svarende til den herskende relative luftfugtighed: $\varphi = p_i/p_s$.

I eksempel 3 (se appendix) er vist en diffusionsberegning, hvor hensyn tages til, at de indgående materialer er fugtige.

Udtørringen af byggematerialer vil normalt ikke kvantitativt kunne behandles som ren vanddampdiffusion. En nærmere redegørelse for beregningsmetoder samt disses overensstemmelse med praktiske forhold er givet i [28].

4.3. Klimabetingelser for fugtberegninger

Fugtberegninger bør udføres efter følgende principper:

- 1) Det undersøges, om der kan forekomme fugtakkumulation.
- 2) Hvis dette er tilfældet, beregnes den maksimale mængde, der kan akkumuleres i løbet af en vinter.
- 3) Denne kondensmængde kan tolereres, hvis den ikke medfører en væsentlig nedsættelse i bygningsdelens k-værdi eller andre gener, samt hvis det kan vises, at den varme årstid medfører tilstrækkelig udtørring, så fugten ikke akkumulerer år efter år.
- 4) Hvis 3) ikke kan opfyldes, må en passende dampspærre anbringes.

Nedenfor skal omtales, hvorledes klimabetingelserne, der danner grundlag for punkterne 2) og 3), kan fastsættes.

4.3.1. Vinterforhold

Tyskerne [4, 38] udfører diffusionsberegninger på grundlag af betingelserne: 60 dage \hat{a} -10°C , 80% RF med indendørsforhold 20°C , 50% RF. Betingelserne synes - uden at de grundlæggende overvejelser iøvrigt kendes - ret strenge.

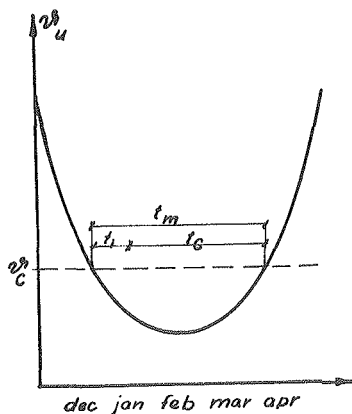


Fig. 37.

Tidslængde med kondensation i en bygningsdel. (Efter BARCS [1]).

Interval avec de la condensation.

Period with internal condensation.

Ungareren BARCS [1] anfører følgende betragtning (fig. 37): Den temperatur, ved hvilken kondensation indtræder (ϑ_c) kan beregnes, f.eks. ved den grafiske metode.

Meteorologiske data kan oplyse, hvilket tidsrum (t_m) udetemperaturen er under ϑ_c ($t_m = f(\vartheta_c)$).

Kondensation indtræder imidlertid ikke øjeblikkeligt på grund af "diffusions-inertien" men efter tiden t_i , der er vanskelig bestemmelig og afhænger af materialet; den kan ofte være af størrelsesordenen flere uger. (Vi vender senere tilbage til det her berørte, ikke-stationære tilfælde).

Som kondensationsperiode bør altså retteligt regnes: $t_c = t_m - t_i$

Store praktiske vanskeligheder er således forbundet med et fornuftigt valg af t_c , og ungarsk standard nøjes derfor med at angive relativt milde betingelser (-2°C , 90% RF), ved hvilke kondensation til gengæld skal undgås.

Den nedenfor beskrevne integrationsmetode tager ingen hensyn til "diffusions-inerti", men kan med fordel anvendes ved lette isoleringsmaterialer, hvis fugtkapacitet er ringe.

Fig. 38 gengiver (efter BECHER [2]) en sumkurve af døgnmiddeltemperaturen over varmesæsonens 227 dage. Det ses, at en ganske god tilnærmelse til kurven udgøres af de to rette linier, givet ved hældningerne:

$$-4^\circ\text{C} < \vartheta < +12^\circ\text{C}: \alpha_2 = 16 \quad \text{dg}/^\circ\text{C}$$

$$-18^\circ\text{C} < \vartheta < -4^\circ\text{C}: \alpha_1 = 0,45 \quad -$$

Beregnes nu den kondenserende fugtmængde pr. tidsenhed $g_1 = f(\vartheta)$, for $\vartheta = -18$, -4 og $+12^\circ\text{C}$, fås tilnærmet g_1 's temperaturafhængighed (fig. 39).

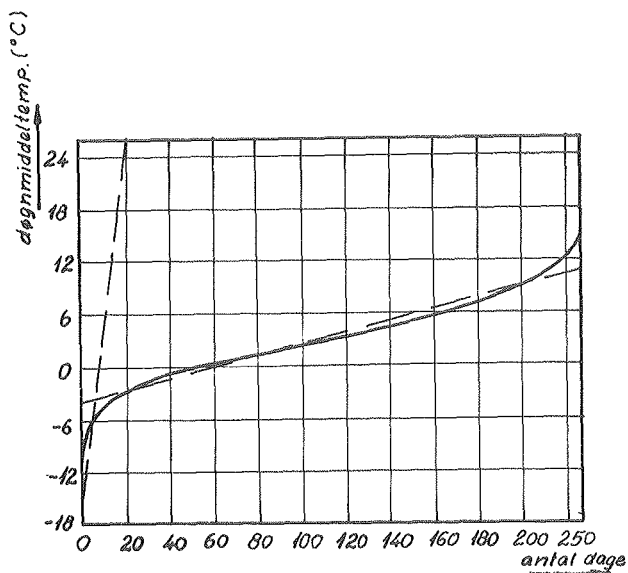


Fig. 38. Sumkurve over døgnmiddeltemperaturen i varmesæsonen (Efter BECHER [2]).

Jours cumulés d'une certaine température moyenne pour la saison froide.

Number of days exceeding a certain mean temperature for the cold season.

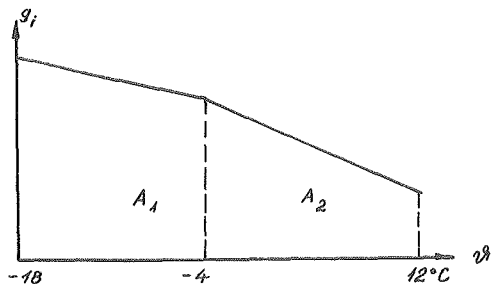


Fig. 39.

Kondensintensitet ved forskellige ude-temperaturer.

L'intensité de condensation à différentes températures extérieures.

Intensity of the internal condensation at different outside temperatures.

Den i varmesæsonen akkumulerede fugtmængde fås nu let, idet

$$\underline{G} = \sum g_i \cdot t = \sum \alpha \int g_i dt \cong \underline{\alpha_1 A_1 + \alpha_2 A_2}$$

4.3.2. Sommerforhold

For beregninger over den forventede udtørring under sommerforhold har tyskerne fastlagt betingelserne:

90 dage å 12°C, 70% RF for mure

90 - - 20°C, 40% RF for tage,

idet beregningerne foregår som sædvanlige diffusionsberegninger; damptrykket sættes lig mætningstrykket i de partier af bygningsdelen, hvor fugtakkumulation har fundet sted (jvf. f.eks. SEIFFERT [39]), og indendørsforholdene sættes til: 12°C, 70% RF.

Metoden kan muligvis benyttes, hvor fugten er udskilt i et afgrænset lag og tørrer ud ved diffusion gennem tørre materialer.

Også i dette tilfælde kan man forestille sig en integrationsmetode som den ovenfor beskrevne. Sjældent vil imidlertid relevante klimadata foreligge, og normalt vil vi da også vurdere den mulige udtørring under sommerforhold alene ved skøn.

4.4. Eksempler på fugtberegninger (stationære forhold)

Eks. 1. Alm. isoleret hulmur

Forudsætninger:

| | |
|---------------------|---|
| λ -værdier: | facademur : $\lambda = 0,70$ kcal/mhdeg |
| | bagmur : $\lambda = 0,45$ - |
| | mineraluld: $\lambda = 0,035$ - |
| diffusionstal: | facademur : $d = 10 \cdot 10^{-3}$ g/mhmmHg |
| | bagmur : $d = 15 \cdot 10^{-3}$ - |
| | mineraluld: $d = 70 \cdot 10^{-3}$ - |
| klimabetingelser: | ude: 0°C , 90% RF ($p_u = 4,1$) |
| | inde: 22°C , 50% RF ($p_i = 9,9$) |

Idet der her ses bort fra evnt. overfladebehandling, bestemmes de indgående diffusionsmodstande:

$$\text{bagmur} : W = \frac{0,06}{15 \cdot 10^{-3}} = 4,0 \text{ m}^2 \text{ hmmHg/g}$$

$$\text{mineraluld: } W = \frac{0,06}{70 \cdot 10^{-3}} = 0,86 \quad -$$

$$\text{facademur : } W = \frac{0,06}{10 \cdot 10^{-3}} = 6,0 \quad -$$

I en grafisk afbildning indtegnes muren med diffusionsmodstandene som abscisse. Temperaturforløb (θ) og heraf kurven for de mættede damptryk indtegnes (p_s) (fig. 40).

Da forbindelseslinien $p_i - p_u$ skærer p_s , forekommer kondensation, den reelle damptrykkurve må gå som p viser med fugt-udskillelse på facademurens inderside.

Kondenseret fugtmængde:

$$\text{diffusion ind i muren: } g_i = \frac{9,9 - 5,1}{4,9} = 0,98 \text{ g/m}^2\text{h}$$

$$\text{diffusion ud af muren: } g_u = \frac{5,1 - 4,1}{6,0} = 0,17 \quad -$$

$$\text{kondenseret: } g_i - g_u = \underline{\underline{0,81 \text{ g/m}^2\text{h}}}$$

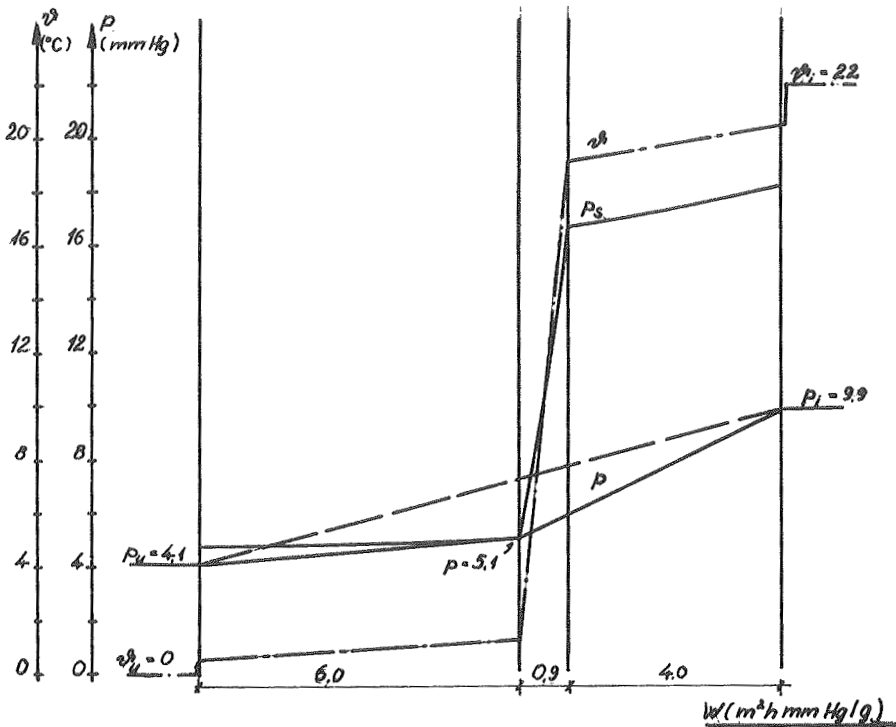


Fig. 40. Diffusionsberegning for hulmur.

Calcul de la diffusion pour un double-mur (briques pleines + laine minérale).

Diffusion calculation for a hollow brick wall with cavity insulation.

En så ringe mængde kan formodes at blive fjernet ved facade-murens kapillarsugning.

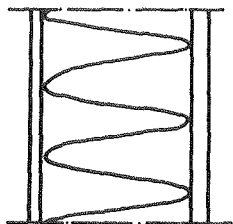
Til sammenligning anføres, at CAMMERER [3] angiver som almindelig retningslinie, at 1 à 2 g/m²h normalt kan anses for tilladeligt i gængse, porøse byggematerialer.

Det kan tilføjes, at Laboratoriet for Varmeisolering ved praktiske undersøgelser af ydervægge udsat for naturlige klimabetingelser aldrig har konstateret kondens i denne vægttype.

Eks. 2. Let facadeelement

I eksemplet vises beregningen for et facadeelement som skitseret i fig. 41 for to tilfælde:

- a) stærkt diffusionsutæt isolering (mineraluld el.lign.)
- b) diffusionstæt isolering (f.eks. god plastskum).



*eternit 6,5 mm gipsplade 9 mm
isolering 100 mm*

Fig. 41.

Let facadeelement.

Élément de façade légère.

Curtain-wall element.

Forudsætninger:

λ -værdier: eternit : $\lambda = 0,50 \text{ kcal/mhdeg}$

isolering: $\lambda = 0,033 \quad -$

gipsplade: $\lambda = 0,17 \quad -$

diffusionstal: eternit : $d = 2 \cdot 10^{-3} \text{ g/mhmmHg}$

isolering: $d = 70 \cdot 10^{-3} \quad -$

el. $d = 1 \cdot 10^{-3} \quad -$

gipsplade: $d = 15 \cdot 10^{-3} \quad -$

klimabetingelser: som i eks. 1.

Beregning af diffusionsmodstande samt optegning af damptryk-diagrammerne foregår som i eks. 1.

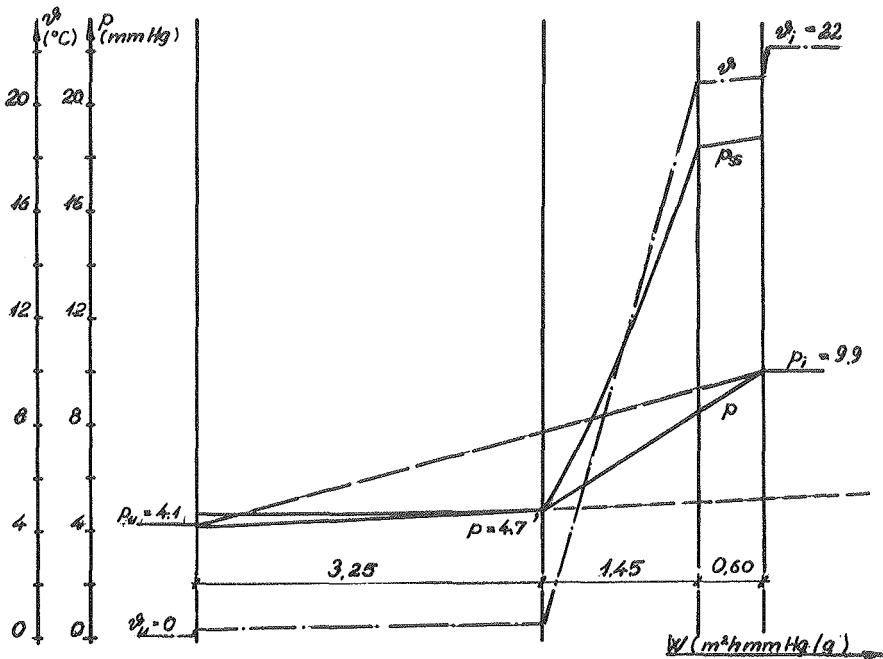


Fig. 42A. Diffusionsberegning for let facadeelement.

Calcul de la diffusion pour un élément de facade légère.

Diffusion calculation for a curtain-wall.

a) (fig. 42A)

$$\varepsilon_i = \frac{9,9 - 4,7}{2,05} = 2,54 \text{ g/m}^2\text{h}$$

$$\varepsilon_u = \frac{4,7 - 4,1}{3,25} = 0,18$$

$$\varepsilon_i - \varepsilon_u = 2,36 \text{ g/m}^2\text{h}$$

Da eternitpladens fugtopsugende egenskaber må formodes at være begrænsede i forhold til den ret store kondensintensitet, beregnes den forventede fugtophobning i isoleringen efter tre måneder:

$$G = 2,36 \cdot 3 \cdot 30 \cdot 24 = 5.100 \text{ g/m}^2,$$

hvilket - ved jævn fordeling i isoleringen - svarer til ca. 5 vol%.

I et let isoleringsmateriale vil dette betyde en væsentlig forringet varmeisoleringsevne (jvf. JESPERSEN [22]).

Særlige foranstaltninger må udføres til forbedring af konstruktionen:

- 1) Dampspærre indskydes på den varme side af isoleringen. Nødvendig diffusionsmodstand af dampspærren fås ved forlængelse af linien $p_u - P'$ til skæring med p_i .

$$\frac{4,7-4,1}{3,25} = \frac{9,9-4,7}{x}, \quad x = 28 \text{ m}^2 \text{ hmmHg/g} \quad (\text{pam})$$

- 2) En ventileret luftspalte indskydes undertiden på isoleringens kolde side. Med en tilstrækkelig effektiv og veludført dampspærre er den dog oftest unødvendig.

b) (fig. 42B)

Af damptrykdiagrammet fremgår, at kondensation ikke forekommer ved de valgte klimaforhold.

Indtegnes tangenten til p_s (vist punkteret) ses, at kondensation indtræder ved $p_i = 13,2 \text{ mmHg}$ svarende til $\varphi_i = 13,2/19,8 \cdot 100\% = \underline{67\% \text{ RF}}$.

Konstruktionen bør altså ikke benyttes i forbindelse med fugtige lokaler, men i dette tilfælde modificeres i henhold til ovenstående punkter 1) og 2).

Eks. 3. Massiv tagkonstruktion

Fugtproblemerne har formentlig vist sig mest markante i forbindelse med de massive tagkonstruktioner.

Vi har derfor viet disse en længere omtale, som gengives i et appendix.

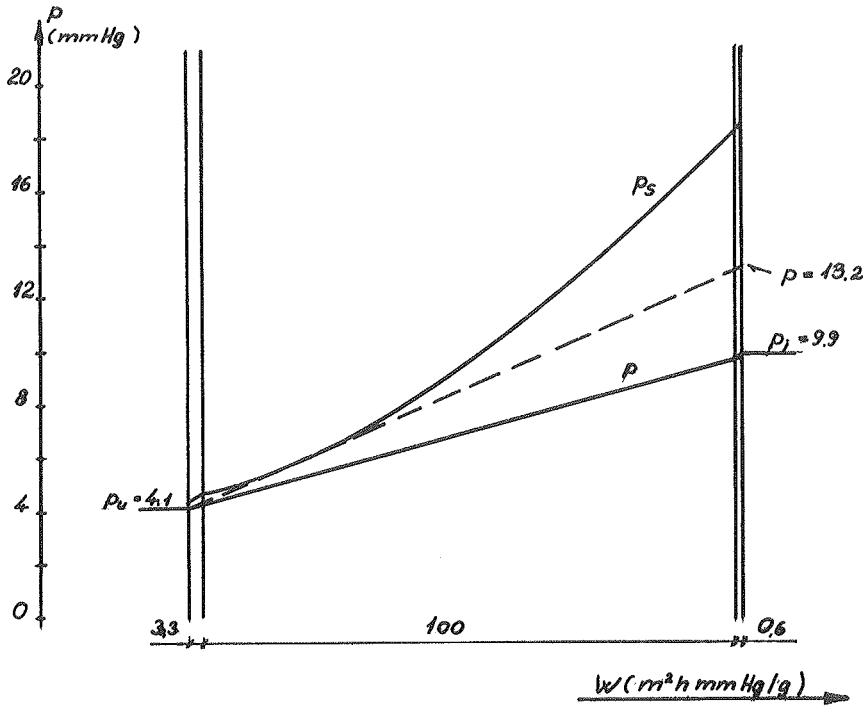


Fig. 42B. Diffusionsberegning for let facadeelement.
 Calcul de la diffusion pour un élément de
 façade légère.
 Diffusion calculation for a curtain-wall.

4.5. Fugtdiffusion i ikke-stationære tilfælde

Almindelige diffusionsberegninger udføres, som beskrevet i det foregående hyppigst med faste, ydre betingelser samt ud fra det endelige damptrykforløb i materialet.

De fleste byggematerialer har imidlertid en ikke uvæsentlig fugtkapacitet, hvorfor indstillingen af det endelige damptrykforløb kræver en ret betydelig tid for at stabilisere sig.

I det følgende skal vises, hvorledes indsvingningsforløbet af damptrykkurven foregår samt en metode til beregning af dette.

Grundlæggningen for fugtdiffusion i det ikke-stationære tilfælde udledes som følger (idet vi fortsat kun betragter det éndimensionale tilfælde):

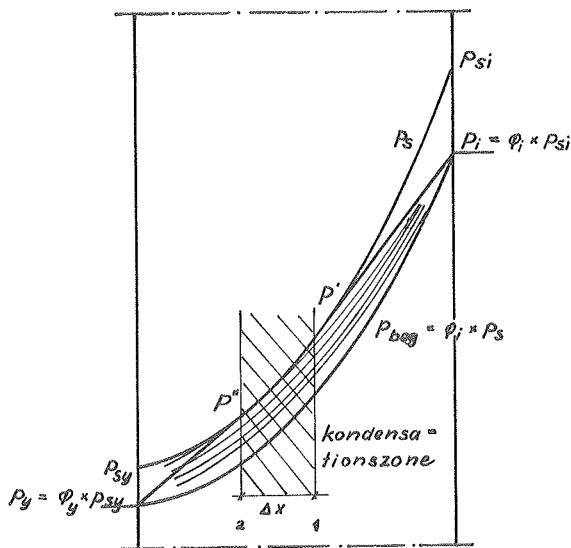


Fig. 43.

Damptrykkurvens
indsvingnings-
forløb.

La mise en équi-
libre des pres-
sions partielles.

The field build-up
of the vapour
pressure.

Elementet i fig. 43 har tykkelsen Δx og afgrænses af planerne 1 og 2.

For den vanddampmængde, der i tiden Δt diffunderer gennem plan 1 haves:

$$g_1 = -d \frac{\partial p}{\partial x} \Delta t \quad (g/m^2)$$

Tilsvarende fås for den mængde, der passerer 2:

$$g_2 = -d \frac{(p + \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x)}{\Delta x} \Delta t \quad (g/m^2)$$

Den fugtmængde, der er afsat i elementet, er altså:

$$g_1 - g_2 = d \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \Delta t \quad (g/m^3)$$

Vi indfører nu den specifikke fugtkapacitet, ξ , hvorved forstås den fugtmængde, der afsættes pr. masseenhed tørt materiale, når det partielle damptryk øges med en enhed. Fugtkapaciteten kan altså f.eks. udtrykkes i g/kg mmHg.

Den ophobede fugtmængde kan altså ligeledes udtrykkes:

$$g_1 - g_2 = \xi \rho_0 \Delta p \quad (g/m^3) ,$$

hvor ρ_0 betegner materialets rumvægt i tør tilstand.

Sammenholdes de to udtryk og gås til grænsen, fås grundligningen:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{d}{\xi \rho_0} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

Den fuldstændige analogi til Fourier-ligningen for varme-transmission bemærkes.

ξ afhænger såvel af temperaturen som af materialets fugtindhold. I stedet for ξ indføres - som omtalt i kapitlet om byggematerialers fugtindhold - den relative fugtkapaci-

tet ξ_0 , defineret ved: $\xi_0 = \xi \cdot p_s$ (g/kg), der fås direkte af sorptionskurvens hældning

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{d}{\xi_0 \rho_0} p_s \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (11)$$

ξ_0 er relativt uafhængig af temperaturen - som sorptionskurven er det -, men afhænger af materialets fugtindhold.

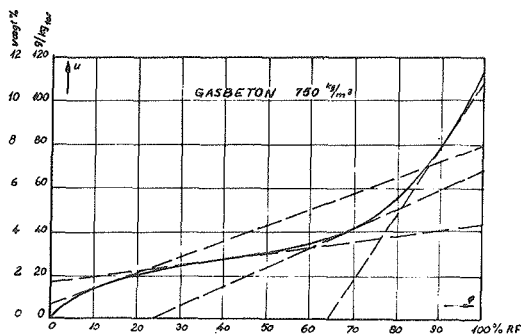


Fig. 44.

ξ_0 -variationen for gasbeton.

La variation de ξ_0 pour béton cellulaire.

The variation of ξ_0 for cellular concrete.

Betragtes en typisk sorptionskurve (fig. 44) ses, at ξ_0 varierer omkring et minimum, ofte beliggende ved $\varphi = 40-50\%$ RF.

ξ_0 's variationsområde er stort - for gasbeton eksempelvis af størrelsesorden $25 < \xi_0 < 450$ g/kg. Det vil altså ofte være nødvendigt at indføre denne variation i eventuelle beregninger.

Til overslagsberegninger kan måske sættes

$$\xi_0 \sim \frac{u_{100\%} - u_{60\%}}{100 - 60} \cdot 1000 \text{ g/kg}$$

4.5.1. Damptrykkurvens indsvingningsforløb

Forudsætningerne for en undersøgelse over damptrykkurvens indsvingningsforløb, som kort skal beskrives i det følgende, er:

- 1) de ydre forhold ($\vartheta_i, \varphi_i, \vartheta_y, \varphi_y$) regnes konstante.
- 2) temperaturforløbet i det betragtede bygningsselement regnes konstant; dette viser sig tilladeligt, idet indsvingningstiden af dette er uvæsentlig i forhold til det søgte for damptrykforløbet.
- 3) diffusionstallet d regnes konstant uafhængig af temperatur og materialets fugtindhold.
- 4) endelig understreges det, at de følgende betragtninger kun gælder for hygroroskopiske fugtindhold, hvor fugttransporten kan regnes at være ren vanddampdiffusion; eventuel kapillartransport af vand i væskeform lades altså ude af betragtning, hvilket formentlig vil være på den sikre side.

Et element (fig. 43) bestående af homogent materiale konditioneret ved forholdene ϑ_i, φ_i og med ligevægtsfugtindholdet u_e underkastes en temperaturforskel ($\vartheta_i - \vartheta_e$) samt en partialtrykforskel ($p_i - p_y$).

Da fugtindholdet u_e svarer til en relativ luftfugtighed φ_i , vil partialtrykkene i elementet ved begyndelsestidspunktet indstille sig efter kurven $p_{beg} = \varphi_i \cdot p_s$, hvor p_s er de måttede dampes tryk kurve svarende til de herskende temperaturer.

I fig. 43 er skitseret forløbet af de partielle damptryk til forskellige tidspunkter.

Kondensation begynder ved det tidspunkt ($t_{kondens}$), hvor kurven berører p_s -kurven, og først når kurven $p_i - P' - P'' - p_y$ - hvor $p_i - P'$ og $P'' - p_y$ er tangenter til p_s - er nået, er de stationære forhold indtruffet, ud fra hvilke almindelige diffusionsberegninger foretages.

Beregning af indsvingningsforløbet kan foretages ved hjælp af grundligningen (11). Hertil findes en række numeriske løsninger (se f.eks. [7, 32]), som dog ikke her skal behandles nærmere. En evt. beregning vil vel iøvrigt i dag foretages v.h.j. af analogregnemaskine eller datamat.

Som eksempel på en beregning af denne type omtales et af CHLUSOV [6] publiceret eksempel:

En gasbetonplade med to lag tagpap på den kolde side udsættes for følgende forhold:

Inde: $\vartheta_i = 18^\circ\text{C}$, $\varphi_i = 60\%$ RF.

Ude : $\vartheta_u = -8,3^\circ\text{C}$,

For gasbetonen gælder:

Sorptionskurve: se fig. 44

Rumvægt: $\rho_o = 750 \text{ kg/m}^3$

Begyndelsesfugtindhold: 3,9%

Diffusionstal: $d = 25 \cdot 10^{-3} \text{ g/mhmmHg}$

Varmeledningstal: $\lambda = 0,24 \text{ kcal/mhgrd.}$

Tabel 8. Beregning af ξ_o -værdier (efter fig. 44).

| φ | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 |
|-----------|-----|-----|-----|----|----|----|----|
| ξ_o | 442 | 290 | 175 | 93 | 50 | 36 | 28 |

Af sorptionskurven er beregnet ξ_o -værdier for en række φ . Resultatet fremgår af tabel 8. Dampkapaciteten har et minimum omkring $\varphi \approx 40\%$ RF, hvilket svarer til kurvens vendetangent.

Tagdækningens diffusionsmodstand er sat til:

$$W = 18,6 \text{ m}^2 \text{hmmHg/g.}$$

Damptrykkurvens indsvingningsforløb er nu beregnet ved Schmidt's metode, idet tagpladen er delt i fem lige store lag. Endvidere tages der hensyn til kapacitetsværdiernes variation. For detalillerne i rekursionsberegningen skal der ikke redegøres.

Man finder, at kondensation begynder i det øverste lag efter 49 døgns forløb (!), og denne lange "indsvingningstid" er formentlig en væsentlig del af forklaringen på, at denne form for tagkonstruktion viser sig anvendelig over ikke for fugtige lokaler, skønt en traditionel, "stationær" beregning viser kondensation af væsentlige fugtmængder. Herudover har kapillarsugningen væsentlig betydning. Under denne synsvinkel har VOS [46], som tidligere påpeget (afsn. 3.2), behandlet samme eksempel grundigt.

Fig. 45, kurve 2 viser fugtfordelingen i gasbetondækket efter beregningerne. Kurve 1 angives at være resultat af bestemmelsen af fugtindholdet efter et forsøg i klimakammer med de samme betingelser. Overensstemmelsen mellem de to kurver er næsten overraskende fin.

Kurve 3 angiver resultatet af en beregning, hvor man har benyttet en fast værdi for ξ_0 :

$$\xi_0 = \frac{u_{100\%} - u_{70\%}}{100 - 70} \cdot 1000 = 247 \text{ g/kg.}$$

Kurven afviger betydeligt fra kurve 1 og 2.

Indføres temperaturen ϑ i stedet for abscissen x i grundligningen (11), fås:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{d}{\lambda^2 \rho_0 \xi_0} p_s Q^2 \frac{\partial^2 p}{\partial \vartheta^2}$$

På grundlag af denne ligning kan udledes en tilnærmet formel til hjælp ved skøn over indsvingningstiden, t_{kondens} før kondensationens indtræden. Der forudsættes homogene materialer.

Omkring begyndelsestidspunktet har ligningen formen:

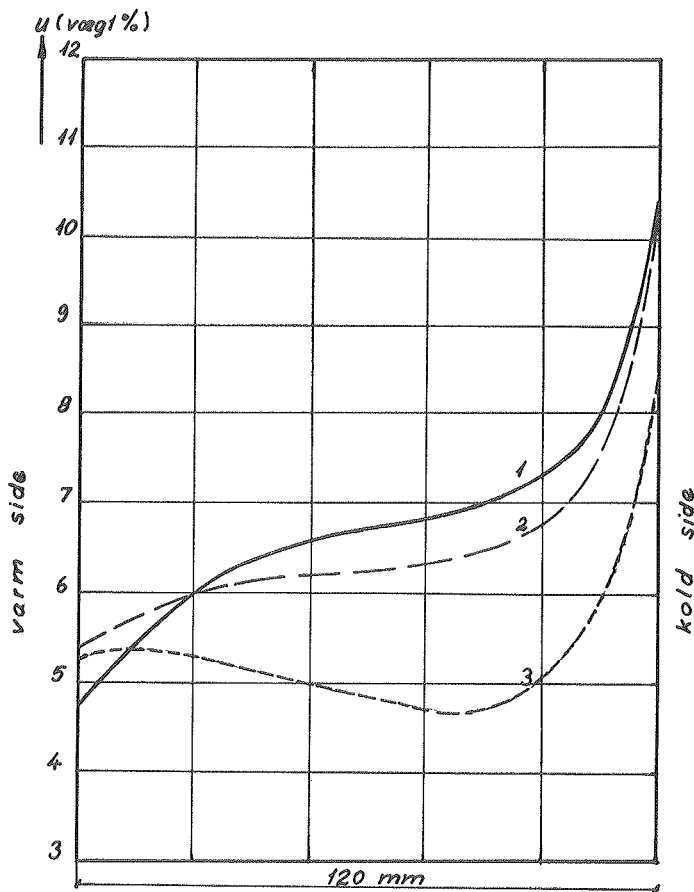


Fig. 45. Fugtfordeling i gasbetontagplade ved indtræden af kondens. Kurve 1: Bestemt eksperimentelt. Kurve 2: Beregnet med variabel ξ_0 . Kurve 3: Beregnet med fast ξ_0 . (Efter CHLUSOV [6]).

Répartition d'humidité dans un élément de toiture en béton cellulaire (début de la condensation). Courbe 1: Déterminée expérimentalement. Courbe 2: Calculée avec ξ_0 variable. Courbe 3: Calculée avec ξ_0 constant.

Moisture distribution in a gasconcrete roof (condensation starting.) Curve 1: Found experimentally. Curve 2: Calculated with variable ξ_0 -value. Curve 3: Calculated with constant ξ_0 -value.

$$\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\text{beg}} = \frac{d}{\lambda^2 \rho_o \xi_o} p_s Q^2 \varphi_i \frac{\partial^2 p_s}{\partial \vartheta^2}$$

Når kondensation indtræder, haves:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\text{kondens}} = \frac{d}{\lambda^2 \rho_o \xi_o} p_s Q^2 \frac{\partial^2 p_s}{\partial \vartheta^2}$$

For middelhastigheden af partialtrykkets ændring fås altså:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\text{middel}} = \frac{d}{2\lambda^2 \rho_o \xi_o} p_s Q^2 \frac{\partial^2 p_s}{\partial \vartheta^2} (1 + \varphi_i)$$

Differensen i partialtrykværdier er:

$$p_{\text{kondens}} - p_{\text{beg}} = \Delta p = p_s (1 - \varphi_i)$$

Som tilnærmet udtryk for den tid, der forløber, inden kondensation indtræder, fås altså:

$$t_{\text{kondens}} = \frac{\lambda^2 \rho_o \xi_o}{d} \cdot \frac{2}{Q^2 p_s} \cdot \frac{1 - \varphi_i}{1 + \varphi_i} \quad (12)$$

Værdier for mætningstrykket p_s 's andet afledede m.h.t. temperaturen fremgår af tabel 6 (pag. 81).

Udtrykket $\lambda^2 \rho_o \xi_o / d$ kan kaldes materialets "fugtstabilitetskoefficient", idet man herigennem får indtryk af indsvingningsforløbets varighed.

I tabel 9 er eksempelvis udregnet størrelsesordenen af stabilitetskoefficienten for nogle typiske materialer:

Tabel 9: Stabilitetskoefficienten for nogle typiske materialer.

| | λ (kcal/mhdeg) | ρ_o (kg/m ³) | ξ_o (g/kg) | d (g/mhmmHg) | $\lambda^2 \rho_o \xi_o / d$ |
|---------------|---------------------------|----------------------------------|-------------------|--------------------|------------------------------|
| Beton | 1,5 | 2300 | 20 | $2 \cdot 10^{-3}$ | $52 \cdot 10^6$ |
| Gipsplade | 0,17 | 730 | 70 | $4 \cdot 10^{-3}$ | $370 \cdot 10^3$ |
| Gasbeton | 0,15 | 500 | 25 | $11 \cdot 10^{-3}$ | $26 \cdot 10^3$ |
| Træfiberplade | 0,045 | 300 | 125 | $27 \cdot 10^{-3}$ | $2,8 \cdot 10^3$ |

4.5.2. Byggematerialer som "fugtstødpuder"

Variationen af den relative fugtighed i et lokale skyldes for en stor del temperaturvariationerne, dampproduktionen samt ventilationen, men vil modificeres ved samtidig fugt-absorption og -desorption af tilstedeværende hygroskopiske materialer.

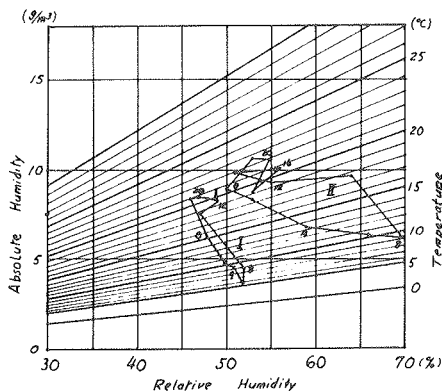


Fig. 46. Daglige fugtighedsvariationer i opholdsrum.
I: trækonstruktion. II: betonkonstruktion.
(Efter HORIE).

Variations journalières de l'humidité dans des chambres occupées. I: construction de bois.
II: construction de béton.

Daily humidity variations in occupied rooms.
I: wood construction. II: concrete block construction.

Fig. 46 viser nogle japanske målinger (HORIE [19A]) over de daglige fugtighedsvariationer i to opholdsrum med nogenlunde samme luftskifte og dampproduktion; I er en trækonstruktion med udstrakt anvendelse af træ og træfiberplade, medens II er opført af betonblokke med pudsede vægge og loft. Det ses, at variationerne i den relative fugtighed er væsentligt dæmpet, hvor det stærkt hygroskopiske materiale er anvendt.

Da diffusionsprocessen af vanddamp er langsom, vil en egentlig fugtligevægt i materialerne ikke indtræde. Kun fugtindholdet i de yderste lag vil berøres af de daglige svingninger i temperatur og fugtighed, og materialets samlede fugtindhold er altså funktion ikke alene af disse, men også af variationerne over længere perioder.

HORIE [19A] har udført fugtabsorptionsmålinger på forskellige materialer. Resultaterne af forsøg udført i temperaturintervallet 5 - 30°C og ved fugtigheder på 30 - 70% RF kan udtrykkes i følgende punkter:

- 1) Vanddamptransporten når en tilsyneladende ligevægt 6 ÷ 12 timer efter en ændring i temperatur eller relativ fugtighed. Dette forklares ved, at den partielle damptrykforskel mellem materialeoverflade og luften hurtigt udlignes, hvorefter fugttransporten gennem materialet foregår væsentligt langsommere. Fugtoptagelsen kan i dette første stadium udtrykkes som en funktion alene af overfladearealet, såfremt materialetykkelsen overstiger en vis, ringe værdi.
- 2) Den tilsyneladende ligevægt er ikke altid den samme - ved samme temperatur og fugtighed -, hvilket viser, at den endelige ligevægtstilstand ikke er nået. Den tilsyneladende ligevægt kan imidlertid benyttes som et praktisk mål for fugtabsorptionen.
- 3) Den optagne eller afgivne fugtmængde kan stort set for samme ændring i den relative fugtighed antages uafhængig af temperaturniveauet.

4) Ved samme relative fugtighed varierer fugtindholdet med temperaturen og praktisk talt proportionalt hermed.

Fugtabsorptionen kan altså udtrykkes:

$$\Delta W = \zeta \Delta \varphi - \nu \Delta \theta, \quad \text{hvor}$$

ΔW er fugtabsorptionen pr. arealenhed (g/m^2),

ζ forøgelsen i fugtindhold pr. arealenhed pr. % RF ved konstant temperatur (g/m^2 % RF),

$\Delta \varphi$ forøgelsen i relativ fugtighed (% RF),

ν forøgelsen i fugtindhold for 1 deg temperaturfald ved konstant relativ fugtighed ($\text{g}/\text{m}^2 \text{deg}$), og

$\Delta \theta$ temperaturforøgelsen (deg).

Tabel 10. Målinger af fugtabsorptionen (HORIE).

| Specimens | Thickness* (mm) | Apparent equilibrium | | Final equilibrium | |
|---------------------|--------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---|--|
| | | ζ (g/m^2 %) | ν (g/m^2 °C) | Increment of moisture content (g/m^3 %) | Permeability ($\text{g}/\text{m h mmHg}$) |
| Ureafoam | 30 | 0.156 | 0 | 26.4 | 0.04 ~ 0.05 |
| Insulation Board | 6 | 1.150 | 0.184 | 340 ~ 460 | 0.02 |
| Plywood (Rowan) | 2 | 0.481 | 0.381 | 620 ~ 970 | 0.0033 ~ 0.0036 |

* One side and perimeter shielded by alfoil.

Tabel 10 angiver nogle ζ - og ν -værdier efter HORIE's målinger. Det ses, at fugtindholdet ved den endelige ligevægt ligger væsentligt højere end ved den tilsyneladende ligevægt.

HORIE viser en metode til overslagsberegninger over variationen i den relative fugtighed i et rum med volumen V (m^3) for-

synet med hygroskopiske materialer med overfladearealerne A_1, A_2, \dots (m^2) og ζ -værdier ζ_1, ζ_2, \dots etc.

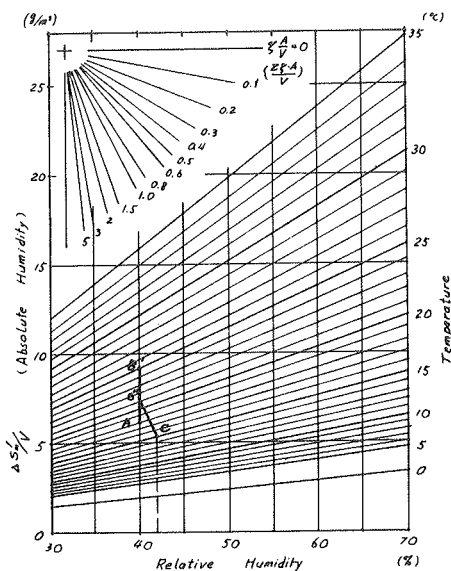


Fig. 47.

Nomogram til bestemmelse af den relative fugtighed. (Efter HORIE).

Nomogramme pour la détermination de l'humidité relative.

Nomogram for determining humidity.

Beregningerne udføres v.h.j. af nomogrammet fig. 47. Følgende eksempel viser fremgangsmåden:

Idet temperaturen sænkes $\Delta\theta$ under en samtidig dampproduktion på d (g), søges stigningen i den relative fugtighed. Begyndelsestilstanden er givet ved punktet A (θ_1, φ_1).

Dampproduktionen vil medføre en stigning i luftens absolutte fugtighed på d/V (AB'). Temperatursænkningen forårsager en absorption i de hygroskopiske materialer på $\Sigma A/V \times \Delta\theta$ og altså et tilsvarende fald i den absolutte fugtighed ($B'B''$). Fra B'' afsættes nu linien $B''C$ med hældningen $\Sigma \zeta A/V$ til skæring med temperaturen θ_2 givet ved $\theta_1 - \theta_2 = \Delta\theta$. Stigningen i den relative fugtighed kan nu aflæses på abscisseaksen.

4.5.2.1. Beregning af fugtabsorptionen

Fugtabsorptionen kan beregnes ved løsning af grundligningen (11) (afsn. 4.5). Herved kan ζ -værdierne fra et givet materiale, hvis diffusionstal og sorptionskurve er kendt, beregnes. Temperaturen indflydelse på fugtindholdet er som tidligere omtalt (afsnit 2.2.5) ret ringe, hvorfor v -værdien ofte vil kunne sættes lig nul.

Nedenfor vises et par eksempler på beregning af ζ -værdierne.

1) Materiale: Blød træfiberplade, $e = 6$ mm, $\rho_o = 215$ g/m².

$$d = 23 \times 10^{-3} \text{ g/mhmmHg}, \quad \xi_o = 125 \text{ g/kg}$$

$$k = \frac{d}{\xi_o \rho_o} p_s \cong 20 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$$

Begyndelsestilstand: $(\vartheta_1, \varphi_1) = (25^\circ\text{C}, 30\% \text{ RF})$

Slut : $(\vartheta_1, \varphi_2) = (25^\circ\text{C}, 70\% \text{ RF})$

Til beregningen er benyttet Hottel's kurver [32] med en overgangsmodstand på $1/5 \text{ m}^2\text{hmmHg/g}$.

Fig. 48 viser den således beregnede variation i de relative fugtigheder ved henh. overfladen samt det inderste lag af materialet. Det ses, at efter ca. 6 timer har dette materiale næsten indstillet sig i den endelige ligevægtstilstand.

Ifølge sorptionskurven er fugtindholdet herved steget med ca. 1 vol.% $\sim 60 \text{ g/m}^2$, hvorfor ζ -værdien beregnes til:

$$\zeta = \frac{60}{40} = 1,5 \text{ g/m}^2 \% \text{ RF}.$$

I dette tilfælde, hvor den endelige fugtligevægt næsten er indtruffet, vil ζ også kunne beregnes af udtrykket:

$$\zeta \sim \xi_o \times \rho_o \times e,$$

der altså kun er gældende for tynde, dampgennemtrængelige materialer.

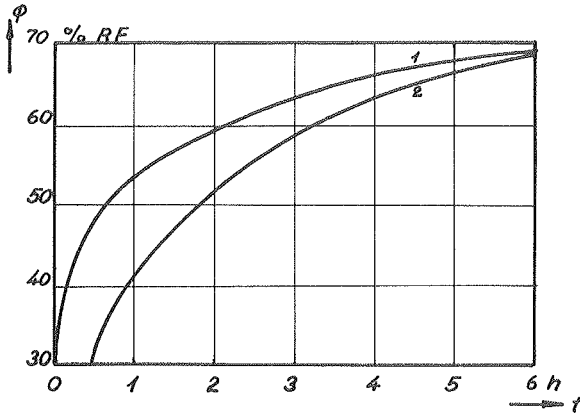


Fig. 48. Variation af den relative fugtighed i blød træfiber-plade ved momentan ændring af den omgivende relative luftfugtighed fra 30 til 70 % RF.
1: Ved ydersiden, 2: 6 mm fra overfladen.

Variation de l'humidité relative dans une plaque de fibre de bois à un changement brusque de l'humidité ambiante de 30 à 70 % HR.

1: à la surface. 2: 6 mm de la surface.

Variation of the relative humidity in wood fibre board corresponding to a sudden change of the surrounding humidity from 30 to 70 % RH.

1: At the surface. 2: 6 mm from the surface.

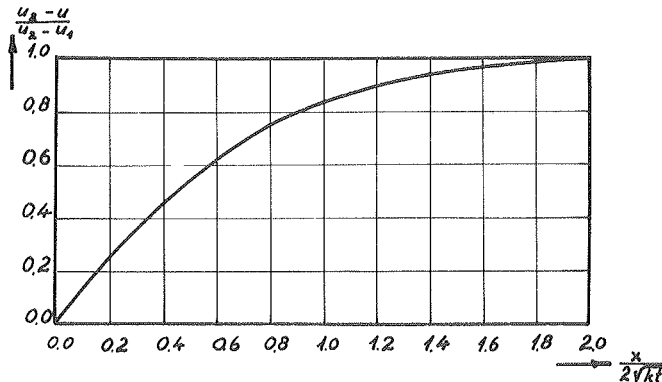


Fig. 49. Grafisk løsning af diffusionsligningen; uendelig tyk plade. (Efter LÜCK).

Solution de l'équation de diffusion; plaque d'épaisseur infinie.

Graphical solution of the diffusion-equation; infinitely thick plate.

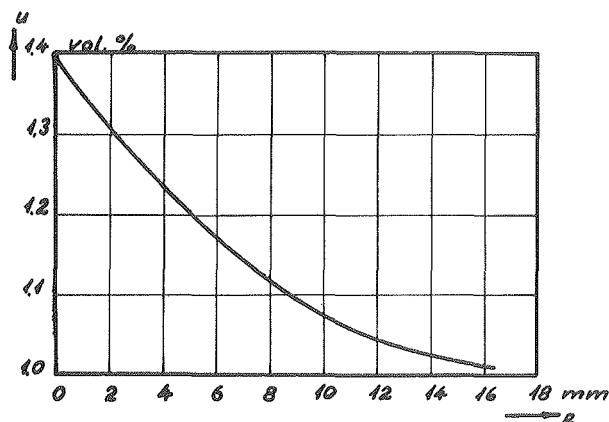


Fig. 50. Fugtfordelingen i gips af stor tykkelse 2 timer efter en ændring af den omgivende fugtighed fra 30 til 70 % RF.

Répartition de l'humidité dans plâtre de grand épaisseur deux heures après un changement de l'humidité ambiante de 30 à 70 % HR.

Moisture pattern in plaster of great thickness two hours after a change of the surrounding humidity from 30 to 70 % RH.

2) Materiale: Gips. $\rho_0 = 730 \text{ kg/m}^3$.

Fig. 49 viser (efter LÜCK [29]) den grafiske løsning af (11) for en uendelig tyk plade. Ved hjælp heraf beregnes fugtfordelingen efter 2 timer med følgende data:

$$(\vartheta_1, \varphi_1) = (20^\circ\text{C}, 30 \text{ \% RF}), \quad u_1 = 1,0 \text{ vol\%}$$

$$(\vartheta_1, \varphi_2) = (20^\circ\text{C}, 70 \text{ \% RF}), \quad u_2 = 1,4 \text{ vol\%}$$

$$d \cong 9,5 \times 10^{-3} \text{ g/mhmmHg}, \quad \xi_0 \cong 16,5 \text{ g/kg}$$

$$k \cong 14 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{h}.$$

Fig. 50 viser resultatet. Af fugtfordelingskurven beregnes den absorberede fugtmængde til ca. 184 g/m^2 , hvorefter fås:
 $\zeta \sim 4,5 \text{ g/m}^2 \text{ \% RF}$.

5. FORSØGSARBEJDE

5.1. Målsætning

Som det er fremgået af det foregående afsnit om praktiske beregningsmetoder, er det med kendskab til diffusionstallet d muligt ved simple metoder at beregne fugttransporten i dampform.

Diffusionstallet måles imidlertid normalt under isoterme forhold (jvf. afsnit 3.1.1), mens fugttransporten gennem mure og vægge i praksis vil foregå under en samtidig varme-transmission.

Visse teoretiske overvejelser (jvf. afsnit 2.3.5), der er underbygget ved forsøg på jordarter, tyder på at temperaturgradienten har en vis indflydelse på fugttransporten. Et væsentligt formål med det foreliggende forsøgsarbejde er derfor at undersøge temperaturgradientens betydning. Vil det i praksis være muligt at benytte den simple diffusionsligning: $g = -d \partial p / \partial x$, hvor diffusionstallet d er målt under isoterme forhold? Eller har temperaturgradienten en indflydelse af en sådan størrelsesorden, at diffusionstallet må korrigeres?

Den samlede fugttransport bør, som tidligere nævnt (afsnit 2.3.5), udtrykkes ved: $g = -d \partial p / \partial x - k \rho_0 \partial u / \partial x$, hvor sidste led giver udtryk for kapillarsugningen.

Imidlertid vil kapillarsugningen så godt som aldrig kunne beregnes, da såvel k -værdien som fugtindholdet vil være ukendt. Følgende spørgsmål er derfor undersøgt: Er det normalt praktisk muligt at se bort fra kapillarsugningen? Hvad er dens størrelsesorden, og hvordan kan der evt. korrigeres for den?

Det blev påvist (afsnit 2.3.2.2), at såfremt der er tale om ren diffusion, er fejlen ved at se bort fra temperaturniveauets indflydelse og benytte den simple diffusionsligning kun nogle få procent (ca. 4% ved en ændring fra 10°C til 20°C).

Imidlertid har temperaturniveauet væsentlig større indflydelse på fugtbevægelsen, såfremt denne er i væskeform (ca. 30% ved en tilsvarende ændring) (afsnit 2.3.3). Vi har derfor undersøgt spørgsmålene: Kan man ved beregning af fugttransporten i praksis se bort fra temperaturniveauets indflydelse? Hvor stor er dennes størrelsesorden?

Det er almindeligt kendt (afsnit 3.1), at diffusionstallet afhænger af materialets fugtindhold. De virkninger, der ønskes undersøgt, vil formentlig ligeledes stå i relation til fugtindholdet. Imidlertid vil dette kun i særdeles sjældne tilfælde i praksis være kendt eller kunne bestemmes, da bestemmelse af fugtindholdet oftest medfører sønderdeling af materialet (udtagning af prøver til tørring). Det er derfor valgt at bestemme virkningerne i funktion af den relative luftfugtighed på den varme side.

5.2. Forsøgsapparaturets opbygning

5.2.1. Princip

Forsøgsapparatet består af en "kold" og en "varm" kasse, der hver måler $1,9 \times 1,5$ m indvendig med en højde på 1,95 m.

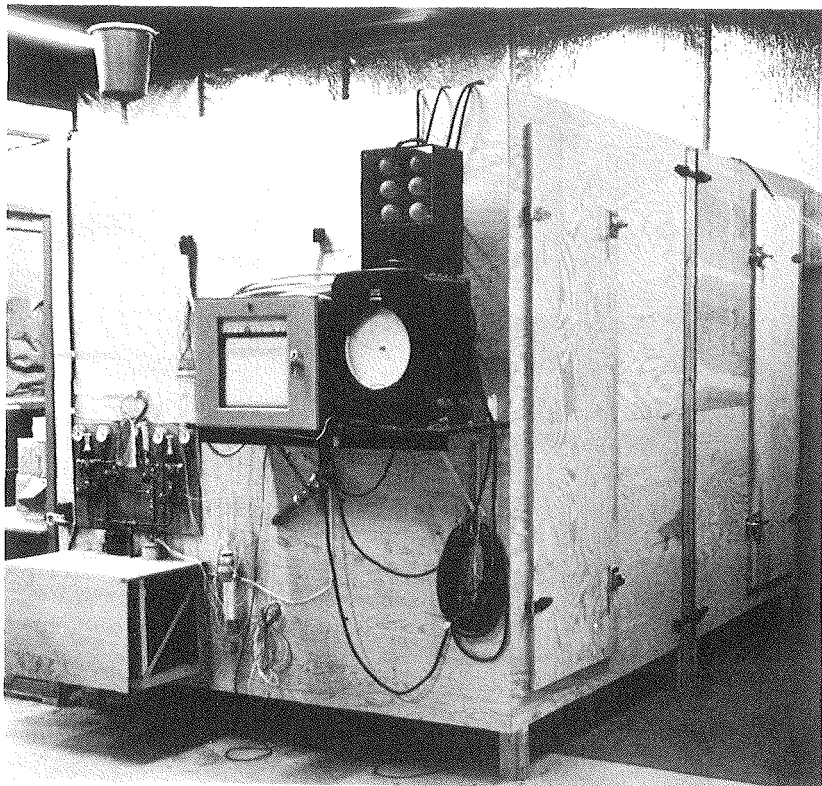


Fig. 51. Forsøgsapparat til bestemmelse af fugttransporten i byggematerialer; kold og varm kasse.

Disposition d'essai pour les mesures du transfert d'humidité dans des matériaux poreux; boîte froide et chaude.

General arrangement for the measurement of moisture transfer in building materials; cold and hot box.

Kasserne er åbne på den ene side; de spændes her sammen omkring en "prøvevæg" med fire felter til indsætning af prøvelegemer. Samtlige flader er beklædt med krydsfinér; der er isoleret med 10 cm mineraluld samt plastmembran på den varmeste side. Den samlede opstilling fremgår af fig. 51. Omkring hvert prøvefelt er anbragt aftagelige plexiglaskasser (fig. 52, 53 og 55), der afgrænser et konditioneret luftvolumen.

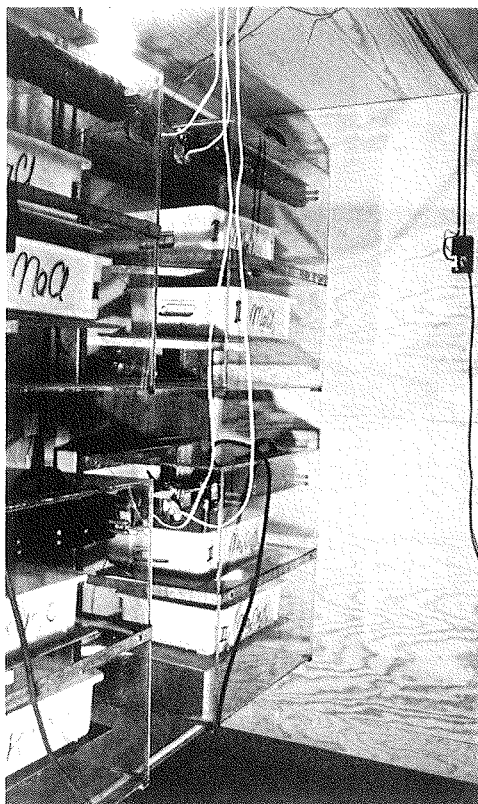


Fig. 52. Blik ind i den varme kasse.
Vue intérieure de la boîte chaude.
Inside view of the hot box.

Forsøgsapparatet giver mulighed for samtidig variation af temperaturerne på kold og varm side af de fire prøvelegemer; det samme gælder luftfugtigheden på den kolde side, mens luftfugtigheden på den varme side varierer mellem de enkelte prøvelfelter. En nærmere beskrivelse fremgår af det følgende.

5.2.2. Varm kasse

Temperaturen bestemmes af en Danfoss termostat i forbindelse med et elektrisk prøvelegeme og en ventilator, det hele indbygget i en mindre enhed.

Variation i den relative luftfugtighed omkring prøvelfelterne fås v.hj. af mættede saltopløsninger anbragt i to skåle. Passende salte er udvalgt med NBS's tabeller [47] som grundlag.

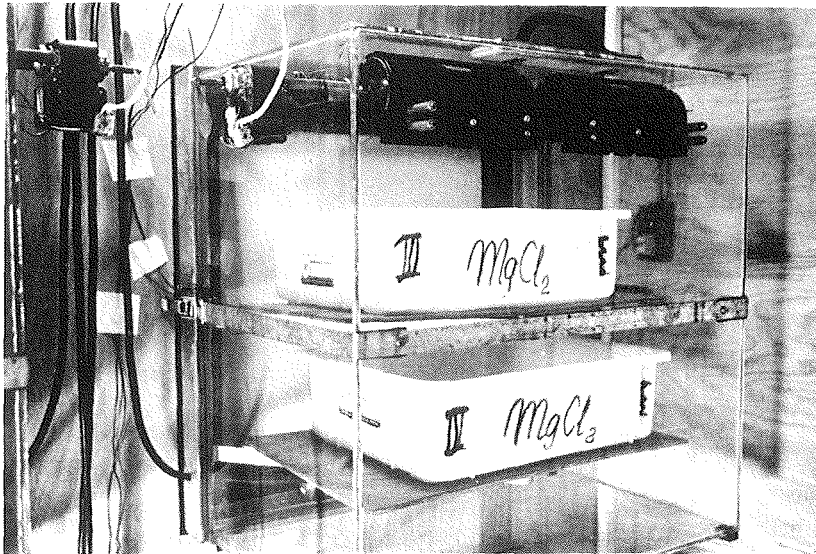


Fig. 53. Prøvelfelt på den varme side.
Panneau d'essai du côté chaud.
Test specimen, hot side view.

Følgende salte er benyttet:

| | | | | | | | | | |
|---|------|--------|------|----|--------|-----------|-----|------------------------|----|
| <u>MgCl</u> ₂ , | hvor | luften | over | en | mættet | opløsning | har | $\varphi \approx 33\%$ | RF |
| <u>Na</u> ₂ <u>Cr</u> <u>O</u> ₂ <u>7</u> , | - | - | - | - | - | - | - | $\varphi \approx 52\%$ | - |
| <u>NaCl</u> , | - | - | - | - | - | - | - | $\varphi \approx 75\%$ | - |
| <u>KNO</u> ₃ , | - | - | - | - | - | - | - | $\varphi \approx 90\%$ | - |

Endelig er undertiden benyttet rent vand.

I disse sidste tilfælde vil altid fremkomme overfladekondensation, og den relative fugtighed vil selvfølgelig være bestemt af prøvelegemets overfladetemperatur.

Små tangentialblæsere er installeret i plexiglaskasserne for at sikre passende luftomrøring således at der kan ses bort fra diffusionsmodstanden af eventuelt stillestående luftlag (fig. 53).

Da den relative fugtighed over mættede saltopløsninger afhænger noget af fordampningen fra overfladen og man således ikke tør regne med tabelværdierne, der er målt i lukkede rum uden fordampning, er der ved hvert prøvefelt installeret dugpunktfølere af LiCl-typen; dugpunkttemperaturerne registreres således kontinuerligt med en nøjagtighed på $\pm 1^\circ\text{C}$ (fig. 51).

De fra saltopløsningerne afgivne fugtmængder bestemmes ved simpel vejning.

5.2.3. Kold kasse

Som det fremgår af diagrammet fig. 54, består kølesystemet af to dele: en køleflade, der arbejder ved direkte ekspansion, mens fire kobberkøleflader anbragt i plexiglaskasserne er led i et brinekølesystem. Små tangentialblæsere af samme type som anvendt på den varme side sørger for god konvektion omkring disse køleflader.

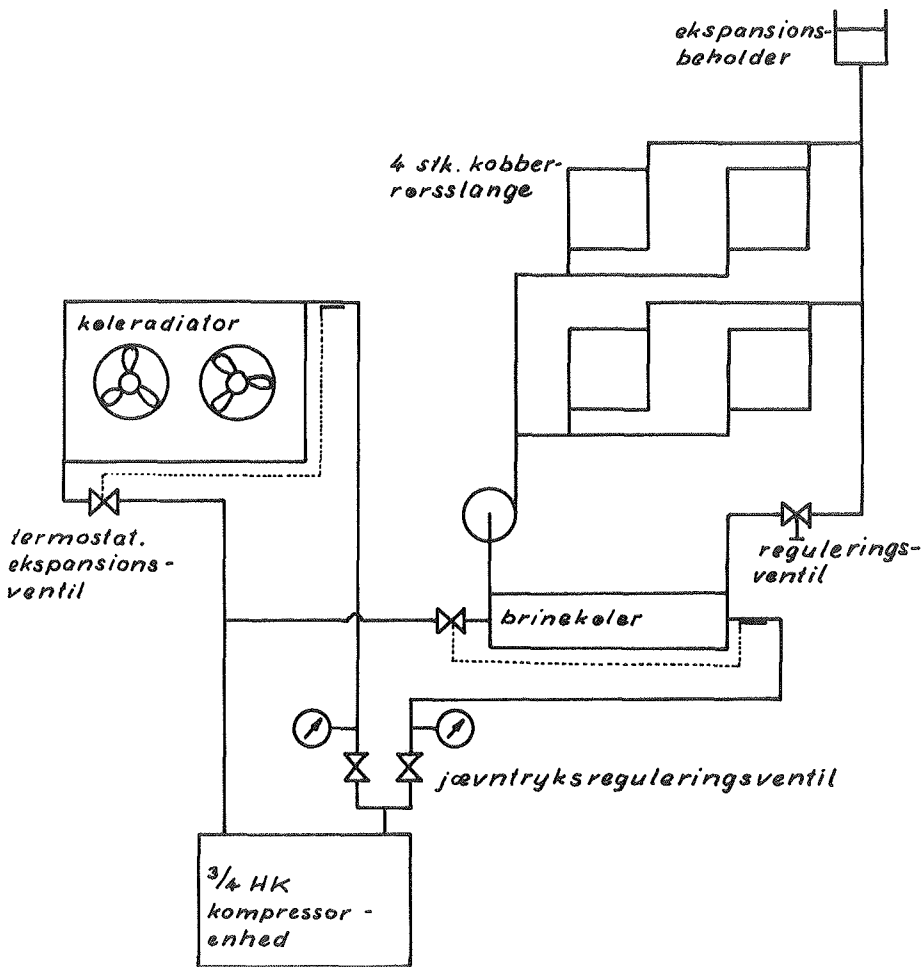


Fig. 54. Principskitse af køleanlæg.

Diagramme simplifié de l'installation frigorifique.

Simplified diagram of the cooling system.

Lufttemperaturen ved prøvefelterne er bestemt af kølevirkningen fra såvel den store køleradiator som de små køleflader. Kølingen indstilles således, at kobberkølefladerne har

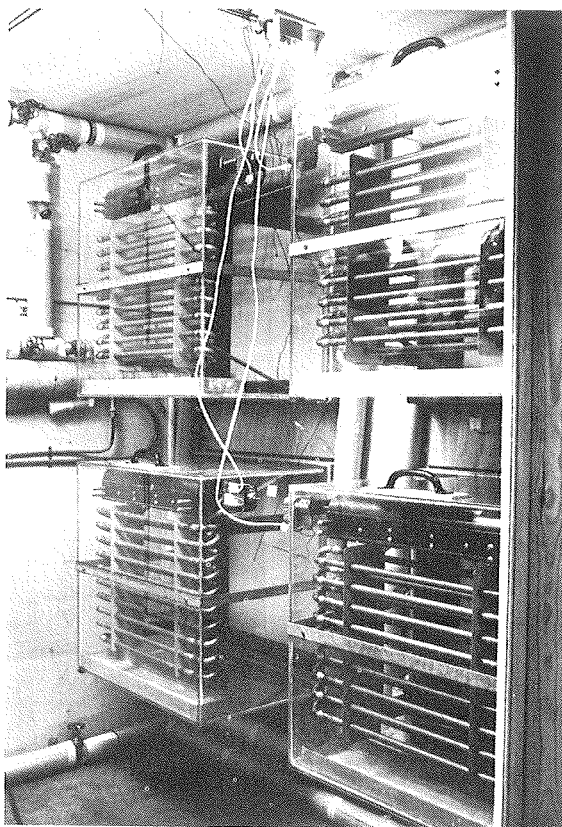


Fig. 55. Blik ind i den kolde kasse.

Vue intérieur de la boîte froide.

Inside view of the cold box.

en koldere temperatur end plexiglaskassernes indervægge. Den fugtmængde, der transporteres gennem prøvelegemet, kondenserer således her, hvorefter den ved afrimning opsamles i en drypbakke.

Dugpunktet på prøvelfeltets kolde side bestemmes af de små køleflader, hvorfor det altså kan indstilles dels gennem selve brinekølingen, dels evnt. ved en drøvling af den cirkulerende brinemængde.

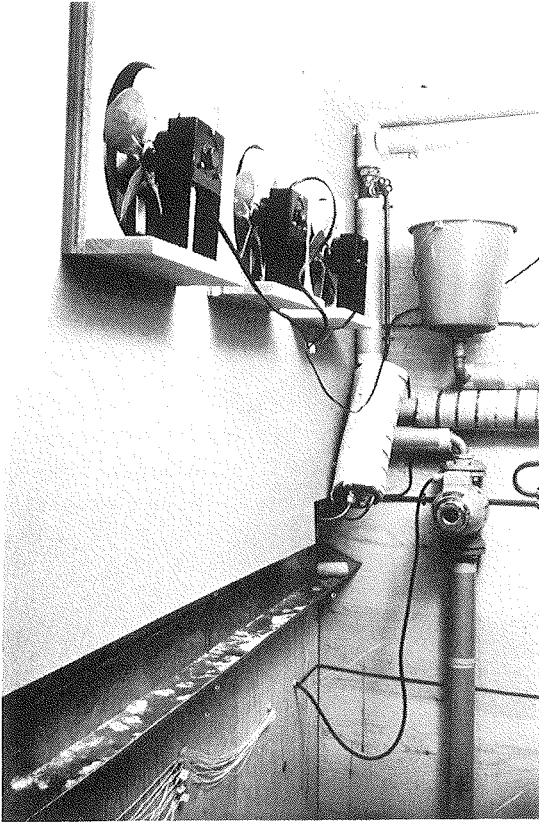


Fig. 56. Køleradiator i den kolde kasse.
 Surface réfrigérante de la boîte froide.
 Cooling surface of the cold box.

Der kan også på den kolde side ses bort fra diffusionsmod-
 standen af luftlaget mellem prøvelegeme og køleflade p.gr.
 af luftomrøringen.

5.2.4. Temperaturmålinger

På grund af lidt uensartet temperaturfordeling i kold og varm kasse, men især p.gr. af store forskelle i de fordampende og kondenserende fugtmængder ved de fire prøvefelter har det ikke været muligt at holde lufttemperaturen i plexiglas-kasserne på kold henh. varm side helt ens.

Såvel lufttemperatur som prøvelegemernes overfladetemperatur registreres derfor v.hj. af termoelementer. Endvidere måles de små kølefladers indgangstemperatur (dugpunktet).

5.2.5. Indsætning af prøvelegemer

Prøvefelterne er som vist i fig. 57 indrammet af en ret diffusionstæt skumplast, der er betrukket med en diffusionstæt tape (mrk. 3M Scotchrap nr. 50). Den samme tape benyttes ved indsætning af prøvelegemerne, som det skematisk fremgår af fig. 58.

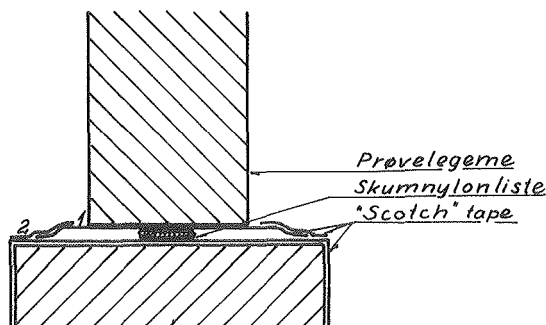


Fig. 58. Prøvelegemets indsætning. (1: klæbeside opad; 2: klæbeside nedad.

Le montage de l'échantillon. (1: face collante tournée en haut; 2: face collante en bas).

The mounting of the specimen. (1: adhesive side upwards; 2: adhesive side downwards).

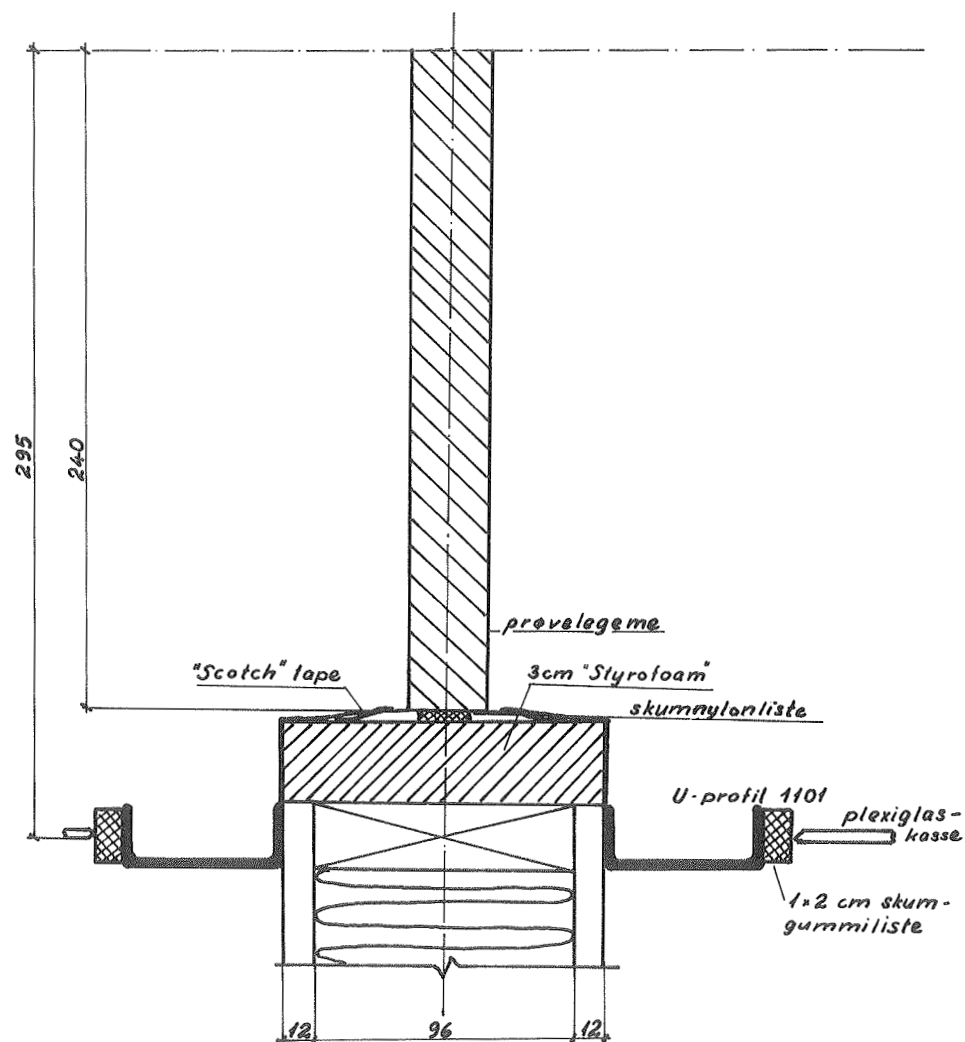


Fig. 57. Prøvefelt.

Coupe de l'échantillon et son montage.

Cross section of the test specimen and its mounting.

Skumnylonlisten sikrer tilstrækkelig god klæbning langs kanten af prøvelegemet; selve randtætheden blev indledningsvis kontrolleret ved indsætning af en metalplade.

Som det ses, kan randfænomener såvel af fugt- som varmemæssig natur skønnes at være undgået ved den valgte indsætningsform.

5.3. Forsøgsplan

Bestemmelse af diffusionstal vil normalt være behæftet med ret stor usikkerhed dels p.gr. af de fleste byggematerialers inhomogenitet, dels undertiden p.gr. af besvær med at holde forholdene tilstrækkeligt konstante under forsøgsperioden, der nødvendigvis må være ret langvarig, så fugtgennemgangen med sikkerhed er blevet stationær (jvf. afsn. 4.5.1), etc..

Da endelig antallet af faktorer, hvis virkning ønskes bestemt (temperaturgradient ($\Delta\vartheta$), temperaturniveau (ϑ_m), relativ fugtighed på den kolde side (φ_{kold}) samt relativ fugtighed på den varme side (φ_{varm})), er ret stort, forudsås et omfattende forsøgsarbejde. Dette er formindsket væsentligt ved anvendelse af statistiske metoder, idet forsøgsplanlægningen er foretaget med støtte i HARSAAE: Statistisk forsøgsmetodik [18].

Som nævnt i det foregående afsnit om forsøgenes målsætning, er man først og fremmest interesseret i viden om størrelsesordenen af indflydelsen fra $\Delta\vartheta$, ϑ_m , φ_k og φ_v på fugttransporten. Man forudsætter endvidere, at damptrykgradienten er af helt afgørende betydning for den samlede fugtgennemgang.

Forsøgsarbejdet er derfor planlagt som såkaldt "simple faktorforsøg", hvor $\Delta\vartheta$, ϑ_m og φ_k varierer på to niveauer, og hvor den målte størrelse er den transporterede fugtmængde pr. tidsenhed divideret med damptrykforskellen, hvilket netop er udtryk for det tilsyneladende diffusionstal. Da forsøgsapparatet giver mulighed for samtidige forsøg på fire prøvelegemer, måles det tilsyneladende diffusionstal ved fire niveauer af φ_{varm} : φ_1 , φ_2 , φ_3 og φ_4 (stigende RF).

[Princippet i et fuldstændigt faktorforsøg kan f.eks. forklares ud fra et faktorforsøg i to faktorer, a og b: Der udføres $2^2 = 4$ forsøg: (1), a, b og ab, hvor begge faktorer er på lavt niveau i forsøg (1), a på højt og b på lavt niveau i forsøg a, etc.

Forsøgsresultaterne kan beskrives således:

Forsøg (1) : J

- a : J + α

- b : J + β

- ab : J + α + β + $\alpha\beta$, hvor

α betegner indflydelsen fra a alene og $\alpha\beta$ indflydelsen fra samspillet mellem a og b. Virkningen af den enkelte faktor kan derfor fås af summen af forsøgsresultater med faktoren på højt niveau minus de tilsvarende med faktoren på lavt, multipliceret med $1/2$].

Da man ved de foreliggende forsøg har ønsket at ligge praktiske forhold så nær som muligt, men på den anden side af hensyn til målenøjagtigheden har fordret en fugttransport af nogenlunde stor størrelsesorden, varieres temperaturen på den varme side i intervallet 25-35°C og på den kolde i intervallet -10 - 0°C.

Den endelige forsøgsplan fremgår af tabel 11.

Tabel 11: Forsøgsplan

| Forsøgs- betegnelse | Karakteristika | Forsøgsforhold | Faktorniveau |
|---|--|---|--|
| (1) | alle faktorer på lavt niveau | $\vartheta_{\text{luft, varm}} \cong 25^\circ\text{C}$ $\vartheta_{\text{luft, kold}} \cong -5^\circ\text{C}$ $\varphi_k \cong 65\% \text{ RF}$ | $\Delta\vartheta \cong 30^\circ\text{C}$ $\vartheta_n \cong 10^\circ\text{C}$ $\varphi_k \text{ lav}^*)$ |
| $\Delta\vartheta$ | $\Delta\vartheta$ på højt, øvrige på lavt niveau | $-10 - 30^\circ\text{C}$ $\varphi_k \cong 65\% \text{ RF}$ | $\Delta\vartheta \cong 40^\circ\text{C}$ $\vartheta_m \cong 10^\circ\text{C}$ $\varphi_k \text{ lav}$ |
| ϑ_m | ϑ_m på højt, øvrige på lavt niveau | $0 - 30^\circ\text{C}$ $\varphi_k \cong 65\% \text{ RF}$ | $\Delta\vartheta \cong 30^\circ\text{C}$ $\vartheta_m \cong 15$ $\varphi_k \text{ lav}$ |
| $\Delta\vartheta \vartheta_m$ | $\Delta\vartheta$ og ϑ_m på højt, φ_k på lavt niveau | $-5 - 35^\circ\text{C}$ $\varphi_k \approx 65\% \text{ RF}$ | $\Delta\vartheta \approx 40^\circ\text{C}$ $\vartheta_m \cong 15$ $\varphi_k \text{ lav}$ |
| φ_k | φ_k på højt, øvrige på lavt niveau | $-5 - 25^\circ\text{C}$ $\varphi_k \cong 85\% \text{ RF}$ | $\Delta\vartheta \cong 30^\circ\text{C}$ $\vartheta_m \approx 10$ $\varphi_k \text{ høj}$ |
| $\varphi_k \Delta\vartheta$ | φ_k og $\Delta\vartheta$ på højt, øvrige på lavt niveau | $-10 - 30^\circ\text{C}$ $\varphi_k \approx 85\% \text{ RF}$ | $\Delta\vartheta \cong 40^\circ\text{C}$ $\vartheta_m \approx 10$ $\varphi_k \text{ høj}$ |
| $\varphi_k \vartheta_m$ | φ_k og ϑ_m på højt, øvrige på lavt niveau | $0 - 30^\circ\text{C}$ $\varphi_k \cong 85\% \text{ RF}$ | $\Delta\vartheta \cong 30^\circ\text{C}$ $\vartheta_m \cong 15$ $\varphi_k \text{ høj}$ |
| $\varphi_k \vartheta_m \Delta\vartheta$ | alle på højt niveau | $-5 - 35^\circ\text{C}$ $\varphi_k \cong 85\% \text{ RF}$ | $\Delta\vartheta \cong 40^\circ\text{C}$ $\vartheta_m \cong 15$ $\varphi_k \text{ høj}$ |

*) Begge φ_k -niveauer er valgt relativt høje i overensstemmelse med almindelige, praktiske forhold.

5.4. Forsøgenes udførelse

Forsøgsapparatet indreguleres således at lufttemperaturen i plexiglaskasserne ligger så nær de ønskede forsøgsforhold som muligt. Luftfugtigheden på den kolde side indstilles som tidligere omtalt ved en passende drøvling af brinemængde.

Fugtafgivelsen (g) fra saltopløsningerne bestemmes med passende mellemrum afhængig af forsøgsmaterialets dampgennemtrængelighed. V.hj. af dugpunkttemperaturen (ϑ_{dug}) bestemmes herefter fugtafgivelsen pr. døgn pr. mmHg damptrykforskkel, idet denne størrelse er udtryk for det tilsyneladende diffusionstal.

Tabellerne 12 og 13 angiver eksempler på de udførte målinger og beregninger.

V.hj. af formelen (12) afsnit 4.5.1 kan fås et overslag over den nødvendige tid for indstilling af ligevægtsforhold. Ligevægt er iøvrigt indtruffet, når de tilsyneladende diffusionstal er konstante. Middelværdien af disse er bestemt som middeltal af de sidste målinger (standardafvigelse $< 10\%$), jvf. tabel 14.

Tabel 14: Eksempel på beregning af middelværdier og standardafvigelser.

Forsøg: $\Delta \vartheta \vartheta_m \varphi_k$. (Blød træfiberplade).

| | φ_1 | φ_2 | φ_3 | φ_4 |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| S | 49,53 | 54,14 | 87,52 | 189,08 |
| n | 5 | 5 | 5 | 5 |
| S/n | 9,91 | 10,83 | 17,50 | 37,82 |
| SK | 491,97 | 586,98 | 1532,19 | 7156,42 |
| S^2/n | 490,64 | 586,23 | 1531,95 | 7150,25 |
| SAK | 1,33 | 0,75 | 0,24 | 6,17 |
| $s^2 = \text{SAK}/(n-1)$ | 0,33 | 0,19 | 0,06 | 1,54 |
| s | 0,57 | 0,44 | 0,25 | 1,24 |
| s/S/n | 5,7% | 4,1% | 1,4% | 3,3% |

Tabel 12: Eksempel på målinger til beregning af tilsyneladende diffusionstal.

Forseg: $\Delta\theta_{m,k}^0$ (bled træfiberplade).

| Måleperiode | \dot{g} (g/deg) | | | | θ_{kold} dug | θ_{dug} varm (°C) | | | | P_{varm} (mmHg) | | | | $\Delta p = P_{\text{varm}} - P_{\text{kold}}$ | | | | $\varepsilon/\Delta p$ (g/deg mmHg) | | | | |
|---------------------|-------------------|-----|-----|------|-------------------------------|---------------------------------|------|------|------|--------------------------|-------|-------|-------|--|-------|-------|-------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | I | II | III | IV | | I | II | III | IV | P_{kold} | I | II | III | IV | I | II | III | IV | I | II | III | IV |
| 22/5 0900-27/5 1000 | 103 | 191 | 404 | 744 | -7,7 | 15,2 | 21,3 | 27,4 | 27,1 | 23,8 | 12,95 | 19,00 | 27,47 | 26,92 | 10,57 | 16,62 | 25,08 | 24,54 | 9,74 | 11,49 | 16,11 | 30,32 |
| 27/5 1000-27/5 1045 | 115 | 184 | 420 | 806 | -7,7 | 16,3 | 21,6 | 27,6 | 27,8 | 23,8 | 13,90 | 19,35 | 27,83 | 28,19 | 11,52 | 16,97 | 25,45 | 25,81 | 9,98 | 10,84 | 16,50 | 31,23 |
| 28/5 1045-29/5 0845 | 111 | 193 | 425 | 864 | -7,8 | 15,9 | 22,0 | 27,6 | 27,8 | 2,36 | 13,55 | 19,83 | 27,83 | 28,19 | 11,19 | 17,47 | 25,47 | 25,83 | 9,92 | 11,05 | 16,69 | 33,45 |
| 29/5 0845-30/5 0845 | 102 | - | 429 | 961 | -8,0 | 15,2 | 23,0 | 27,3 | 27,7 | 2,32 | 12,95 | 21,07 | 27,28 | 28,01 | 10,63 | 18,75 | 24,96 | 25,69 | 9,60 | - | 17,19 | 37,40 |
| 30/5 0845-30/5 1630 | 136 | 182 | 445 | 931 | -8,0 | 17,9 | 22,2 | 27,3 | 27,7 | 2,32 | 15,38 | 20,07 | 27,28 | 28,01 | 13,06 | 17,75 | 24,96 | 25,69 | 10,41 | 10,25 | 17,83 | 36,24 |
| 30/5 1630-31/5 0845 | 123 | 191 | 438 | 1022 | -8,5 | 17,7 | 22,2 | 27,3 | 28,4 | 2,22 | 15,19 | 20,07 | 27,28 | 29,03 | 12,97 | 17,85 | 25,06 | 26,81 | 9,48 | 10,70 | 17,48 | 38,12 |
| 31/5 0845-31/5 1630 | 133 | 201 | 436 | 994 | -8,5 | 17,2 | 22,0 | 27,1 | 27,3 | 2,22 | 14,72 | 19,83 | 26,92 | 27,28 | 12,50 | 17,61 | 24,70 | 25,06 | 10,64 | 11,41 | 17,65 | 39,66 |
| 31/5 1630-1/6 0845 | 109 | 189 | 426 | 978 | -8,5 | 16,2 | 22,0 | 27,0 | 27,8 | 2,22 | 13,81 | 19,83 | 26,74 | 28,19 | 11,59 | 17,61 | 24,52 | 25,97 | 9,40 | 10,73 | 17,37 | 37,66 |

Tabel 13: Eksempel på temperaturmålinger.

Forseg: $\Delta\theta_{m,k}^0$ (bled træfiberplade).

| Måletidspunkt | θ_{luft} v.s. | | | | θ_{luft} k.s. | | | | $\theta_{\text{prøve}}$ v.s. | | | | $\theta_{\text{prøve}}$ k.s. | | | | θ_{varm} | | | | θ_{kold} | | | |
|---------------|-----------------------------|------|------|------|-----------------------------|------|------|------|------------------------------|------|------|------|------------------------------|------|-----|-----|------------------------|-----|-----|-----|------------------------|----|-----|----|
| | I | II | III | IV | I | II | III | IV | I | II | III | IV | I | II | III | IV | I | II | III | IV | I | II | III | IV |
| 31/5 0830 | 35,2 | 34,7 | 34,7 | 32,1 | -6,7 | -6,7 | -4,3 | -1,2 | 30,6 | 30,6 | 29,4 | 25,4 | -2,5 | -1,5 | 3,0 | 4,7 | 36% | 48% | 66% | 80% | -80% | | | |
| 30/5 0830 | 35,7 | 35,5 | 34,7 | 32,1 | -6,3 | -6,3 | -4,6 | -2,9 | 31,1 | 32,1 | 29,8 | 26,2 | -2,4 | 0,5 | 3,8 | 4,4 | 30% | 49% | 66% | 78% | " | | | |
| 29/5 0830 | 35,4 | 35,0 | 34,6 | 32,3 | -6,3 | -6,3 | -4,8 | -3,4 | 30,8 | 31,3 | 29,3 | 27,2 | -2,2 | 0,1 | 2,2 | 5,9 | 31% | 47% | 66% | 78% | " | | | |
| 28/5 1030 | 35,8 | 35,8 | 35,3 | 33,2 | -6,2 | -6,2 | -4,8 | -3,5 | 31,4 | 31,9 | 30,4 | 27,8 | -1,9 | 0,8 | 2,3 | 6,4 | 32% | 44% | 64% | 73% | " | | | |
| 27/5 1000 | 35,2 | 35,0 | 35,0 | 32,7 | -6,0 | -6,0 | -5,1 | -4,6 | 31,1 | 30,8 | 30,1 | 28,0 | -1,9 | -2,3 | 2,6 | 3,0 | 30% | 45% | 65% | 73% | " | | | |
| Middelværdier | 35,5 | 35,4 | 34,9 | 32,3 | -6,3 | -6,3 | -4,7 | -3,1 | 31,0 | 31,3 | 29,8 | 26,9 | -2,2 | -0,5 | 2,8 | 4,9 | 32% | 47% | 65% | 76% | 80% | | | |

5.5. Forsøgsresultater

5.5.1. Materiale: Blød træfiberplade

$$e = 1,3 \text{ cm, tør rumvægt: } \rho_0 = 230 \text{ kg/m}^3$$

5.5.1.1. Målinger

Anvendelse af formel (12) afsnit 4.5.1, viser, at den forventede størrelsesorden for indsvingningstiden af damptrykkurven er 10 h. Da denne således er ret ringe, blev det besluttet at udsætte hvert prøvelegeme for vekslende relative fugtigheder på den varme side for på denne måde ved den senere bearbejdning af resultaterne at nedsætte usikkerheden m.h.t. materialeinhomogenitet.

Forsøgsplanen har således set ud som vist i tabel 15, hvor romertallene angiver prøvelegemerne. Princippet er, at hvert prøvelegeme udsættes for hver φ_{varm} to gange samt for de øvrige faktorvirkninger ved dels højt, dels lavt niveau. På grund af forskellige ændringer, har dette princip, som det ses, dog ikke helt kunnet overholdes.

Tabel 15. Forsøgsplan (blød træfiberplade).

| Forsøg | φ_1 | $\varphi_2^{\varphi_{\text{varm}}}$ | φ_2 | φ_4 |
|--|-------------|-------------------------------------|-------------|-------------|
| (1) | I | IV | III | II |
| $\Delta\vartheta$ | III | IV | I | II |
| ϑ_m | II | III | IV | I |
| $\Delta\vartheta\vartheta_m$ | IV | III | II | I |
| φ_k | IV | I | II | III |
| $\varphi_k \Delta\vartheta$ | III | II | I | IV |
| $\varphi_k \vartheta_m$ | II | I | IV | III |
| $\varphi_k \Delta\vartheta\vartheta_m$ | I | II | III | IV |

Tabel 16 angiver de målte dampgennemgangstal udtrykt i g/døgn/mmHg damptrykforskel. Værdien er bestemt på grundlag af fem gentagne målinger (med ca. 1 døgn mellemrum). Tabellen viser såvel summen af disse (S) som gennemsnitsværdierne (S/n). Endvidere er vist de beregnede kvadratafvigelsessummer (SAK), der giver udtryk for usikkerheden på de enkelte målinger.

Da materialedimensionerne var: $0,48 \times 0,48 \times 0,013 \text{ m}^3$ fås de til dampgennemgangstallene svarende diffusionstal (i g/mhmmHg) ved multiplikation med faktoren:

$$1/24 \times 1/0,48 \times 1,048 \times 0,013 = 2,35 \times 10^{-3}$$

I tabel 17 er vist de gennemsnitligt målte temperaturer og relative fugtigheder. Endvidere er angivet temperaturforskellene over prøvelegemerne samt middelværdierne af temperaturerne i disse (temperaturniveauerne).

ϕ_1 frembragtes af MgCl_2 , ϕ_2 af $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_3$ og ϕ_3 af NaCl , alt i mættet, vandig opløsning. Endelig var der ved ϕ_4 rent vand i skålene, hvilket nødvendigvis har medført overfladekondens. I modsætning til de forrige tre tilfælde udviste prøvelegemerne her et udpræget fugtigt udseende og overfladen var hurtigt grobund for skimmel og mug. Men det bemærkedes, at hele den fordampede vandmængde blev absorberet af materialet.

I alle tilfælde indtrådte efter kort tids forløb en ligevægt i fugtoptagelsen pr. tidsenhed, og samme fugtmængde skønnedes at blive afgivet på den kolde side.

På grundlag af tabel 17 er i figurerne 59A-H optegnet temperatur- og damptryksforløb for samtlige forsøg. Det fremgår heraf, at ϕ_3 er beliggende omkring den grænseværdi, der medfører kondens i materialet.

Forholdet mellem p - og p_s -kurverne angiver den relative fugtighed og kan betragtes som udtryk for materialets fugtindhold.

Tabel 16. Målinger af dampgennemgangstal (g/døgn/mmHg)
(blød træfiberplade).

| Forsøg | φ_1 | φ_2 | φ_3 | φ_4 |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|
| S | 46,18 | 54,87 | 73,78 | 139,68 |
| (1) SAK | 3,90 | 4,96 | 3,34 | 43,13 |
| S/n | <u>9,24</u> | <u>10,97</u> | <u>14,76</u> | <u>27,94</u> |
| S | 50,15 | 64,40 | 105,18 | 173,97 |
| $\Delta\vartheta$ SAK | 4,04 | 2,91 | 5,63 | 22,60 |
| S/n | <u>10,03</u> | <u>12,88</u> | <u>21,04</u> | <u>34,79</u> |
| S | 44,31 | 50,85 | 73,01 | 137,67 |
| ϑ_m SAK | 0,57 | 0,63 | 1,61 | 1,47 |
| S/n | <u>8,86</u> | <u>10,17</u> | <u>14,60</u> | <u>27,54</u> |
| S | 47,73 | 56,19 | 82,31 | 151,30 |
| $\Delta\vartheta_m$ SAK | 0,36 | 7,07 | 1,32 | 20,54 |
| S/n | <u>9,55</u> | <u>11,24</u> | <u>16,46</u> | <u>30,26</u> |
| S | 48,19 | 57,02 | 78,05 | 161,46 |
| φ_k SAK | 1,30 | 2,80 | 0,56 | 9,82 |
| S/n | <u>9,64</u> | <u>11,40</u> | <u>15,61</u> | <u>32,29</u> |
| S | 42,77 | 53,27 | 75,33 | 193,11 |
| $\varphi_k \Delta\vartheta$ SAK | 1,79 | 5,00 | 6,98 | 10,73 |
| S/n | <u>8,55</u> | <u>10,65</u> | <u>15,07</u> | <u>38,62</u> |
| S | 45,73 | 49,43 | 77,94 | 141,17 |
| $\varphi_k \vartheta_m$ SAK | 0,70 | 0,10 | 0,57 | 8,68 |
| S/n | <u>9,15</u> | <u>9,89</u> | <u>15,59</u> | <u>28,23</u> |
| S | 49,53 | 54,14 | 87,52 | 189,08 |
| $\varphi_k \Delta\vartheta \vartheta_m$ SAK | 1,33 | 0,75 | 0,24 | 6,17 |
| S/n | <u>9,91</u> | <u>10,83</u> | <u>17,50</u> | <u>37,82</u> |

Tabel 17. Gennemsnitlige forsøgsforhold
(blød træfiberplade)

| Forsøg | | φ_1 | | φ_2 | | φ_3 | | φ_4 | |
|---------------------------------|------------------|-------------|------|-------------|------|-------------|------|-------------|------|
| | | varm | kold | varm | kold | varm | kold | varm | kold |
| (1) | δ_{luft} | 25,5 | -5,2 | 25,1 | -5,1 | 25,4 | -5,1 | 23,1 | -4,5 |
| | $\delta_{prøve}$ | 22,6 | -2,1 | 21,4 | -2,1 | 21,7 | -0,8 | 19,8 | -0,5 |
| | φ | 32 | 65 | 54 | 65 | 66 | 65 | 93 | 65 |
| | $\Delta\delta$ | 24,7 | | 23,5 | | 22,5 | | 19,3 | |
| | δ_m | 10,3 | | 9,7 | | 10,0 | | 10,2 | |
| $\Delta\delta$ | | 31,1 | -7,8 | 30,7 | -8,0 | 29,8 | -7,2 | 28,0 | -6,7 |
| | | 26,7 | -2,1 | 26,6 | -1,5 | 25,1 | -1,4 | 24,5 | 0,4 |
| | | 32 | 70 | 47 | 70 | 61 | 70 | 81 | 70 |
| | | 28,8 | | 28,1 | | 26,5 | | 24,1 | |
| | | 12,3 | | 12,6 | | 11,8 | | 12,5 | |
| δ_m | | 30,4 | -2,5 | 31,0 | -2,6 | 30,4 | -2,6 | 29,0 | -1,5 |
| | | 27,9 | 0,6 | 27,3 | 3,2 | 26,9 | 2,1 | 25,0 | 4,8 |
| | | 41 | 65 | 50 | 65 | 74 | 65 | 90 | 65 |
| | | 27,3 | | 24,1 | | 24,8 | | 20,2 | |
| | | 14,3 | | 15,3 | | 14,5 | | 14,9 | |
| $\Delta\delta\delta_m$ | | 35,1 | -6,7 | 35,8 | -6,8 | 34,3 | -6,9 | 33,2 | -5,4 |
| | | 28,5 | -1,8 | 29,8 | -2,6 | 29,0 | -1,3 | 28,5 | 4,5 |
| | | 41 | 65 | 48 | 65 | 67 | 65 | 85 | 65 |
| | | 30,3 | | 32,4 | | 30,3 | | 24,0 | |
| | | 13,3 | | 13,6 | | 13,8 | | 16,5 | |
| φ_k | | 26,3 | -5,2 | 27,0 | -5,2 | 26,2 | -5,3 | 25,6 | -4,2 |
| | | 22,9 | -2,3 | 23,7 | -0,7 | 24,5 | -0,7 | 21,6 | 3,2 |
| | | 35 | 88 | 52 | 88 | 70 | 88 | 83 | 88 |
| | | 25,2 | | 24,4 | | 25,2 | | 18,4 | |
| | | 10,3 | | 11,5 | | 11,9 | | 12,4 | |
| $\varphi_k\Delta\delta$ | | 30,7 | -9,8 | 29,4 | -9,8 | 29,4 | -9,7 | 28,0 | -7,2 |
| | | 25,8 | -4,6 | 24,3 | -2,5 | 23,1 | -2,4 | 23,5 | 0,9 |
| | | 35 | 85 | 53 | 85 | 77 | 85 | 85 | 85 |
| | | 30,4 | | 26,8 | | 25,5 | | 22,6 | |
| | | 10,6 | | 10,9 | | 10,4 | | 12,2 | |
| $\varphi_k\delta_m$ | | 30,1 | 0,6 | 29,8 | 0,6 | 29,6 | 0,6 | 28,4 | 1,0 |
| | | 27,3 | 3,2 | 26,8 | 3,5 | 26,4 | 4,6 | 24,6 | 6,8 |
| | | 34 | 88 | 53 | 88 | 69 | 88 | 84 | 88 |
| | | 24,1 | | 23,3 | | 21,8 | | 17,8 | |
| | | 15,3 | | 15,2 | | 15,5 | | 15,7 | |
| $\varphi_k\Delta\delta\delta_m$ | | 35,5 | -6,3 | 35,4 | -6,3 | 34,9 | -4,7 | 32,3 | -3,1 |
| | | 31,0 | -2,2 | 31,3 | -0,5 | 29,8 | 2,8 | 26,9 | 4,9 |
| | | 32 | 80 | 47 | 80 | 65 | 80 | 76 | 80 |
| | | 33,2 | | 31,8 | | 27,0 | | 22,0 | |
| | | 14,4 | | 15,4 | | 16,3 | | 15,9 | |

Middelværdier: $\overline{\varphi_1} = 35\% \text{ RF}$ $\overline{\varphi_{kold}} = 75\% \text{ RF}$
 $\overline{\varphi_2} = 51\% -$ $\overline{\Delta\delta} \approx 25 \text{ deg}$
 $\overline{\varphi_3} = 68\% -$ $\overline{\delta_m} \approx 13^\circ\text{C}$
 $\overline{\varphi_4} = 85\% -$

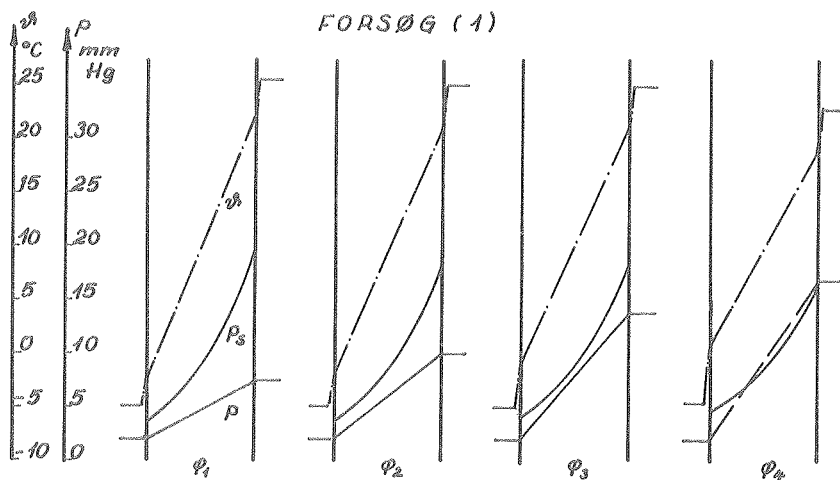


Fig. 59A

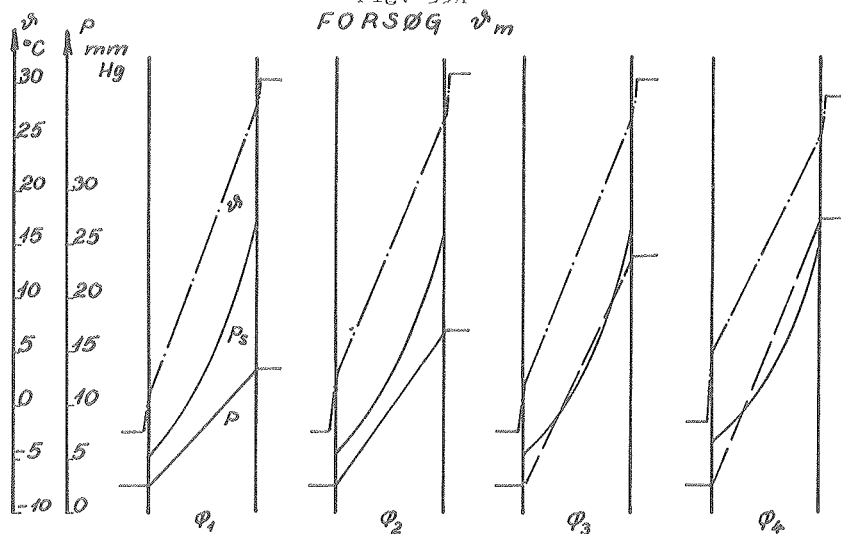


Fig. 59B

Fig. 59. Forsøgsforhold ved fugtgennemgangsundersøgelserne for blød træfiberplade.

Conditions d'essai pendant les mesures du transfert d'humidité en fibre de bois.

Test conditions during the moisture transfer measurements on wood fibre board.

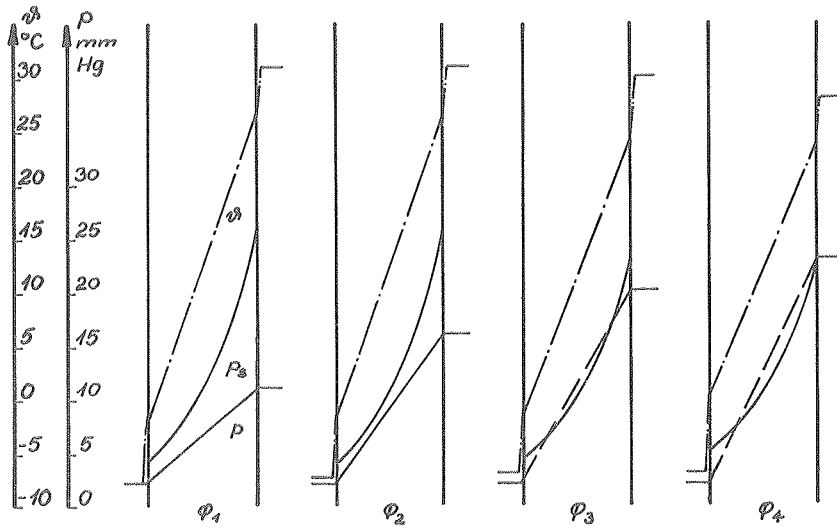
FORSØG $\Delta \vartheta$ 

Fig. 59C

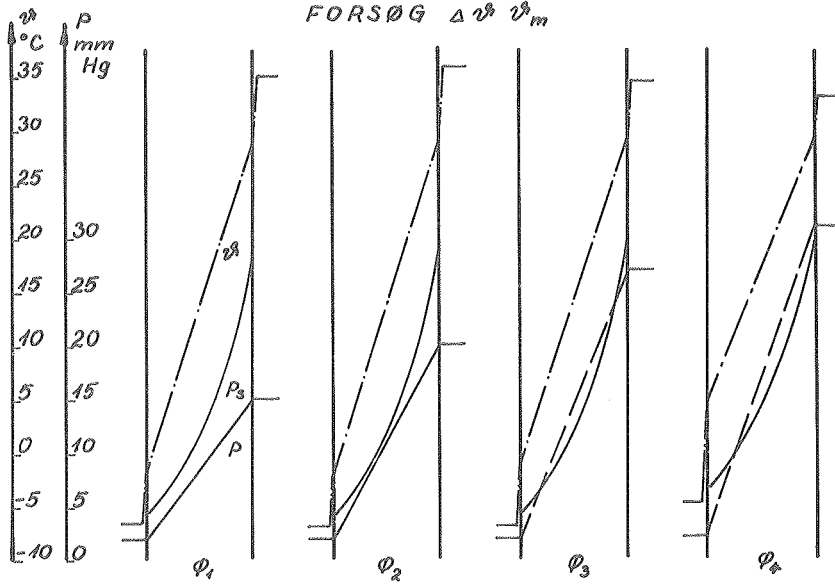
FORSØG $\Delta \vartheta \vartheta_m$ 

Fig. 59D

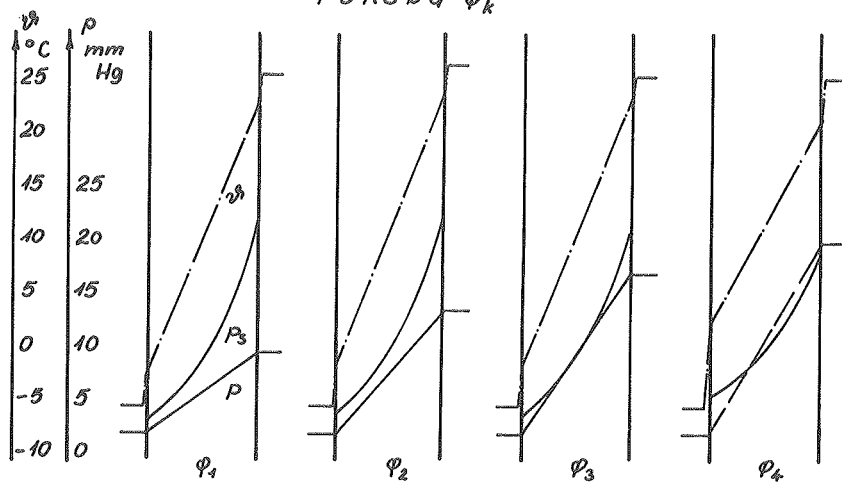
FORSØG φ_k 

Fig. 59E

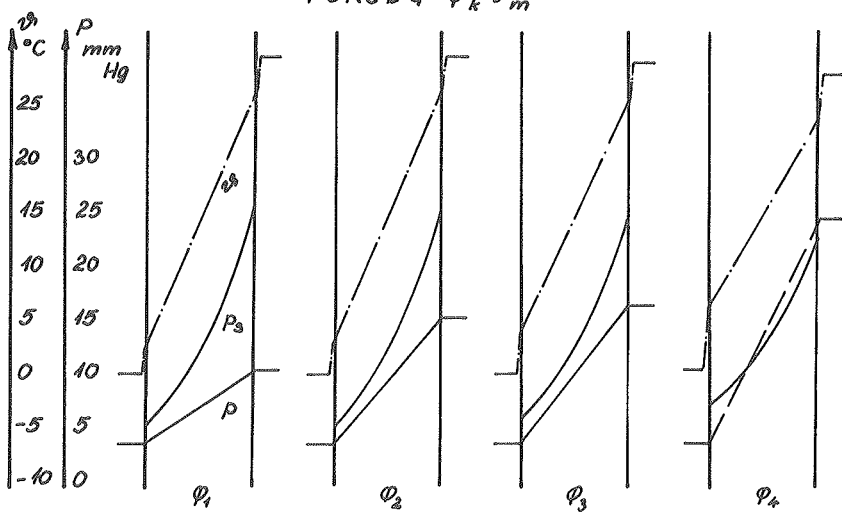
FORSØG $\varphi_k v_m$ 

Fig. 59F

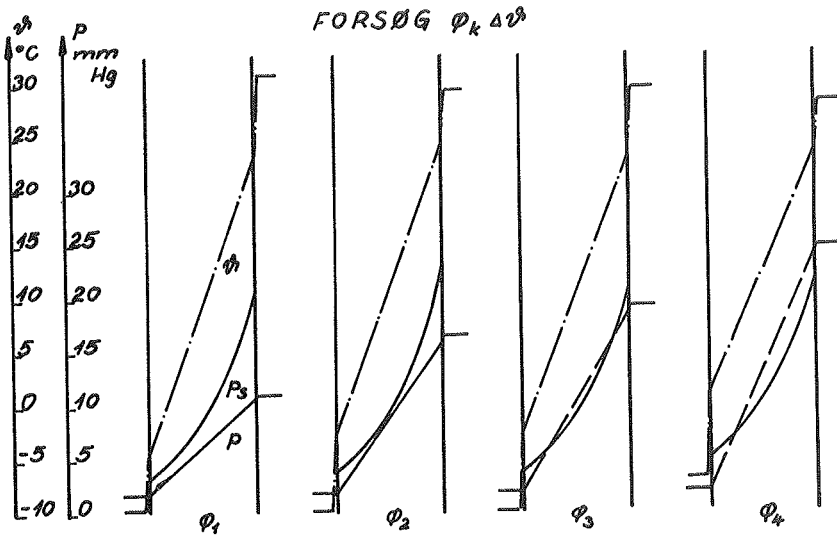


Fig. 59G

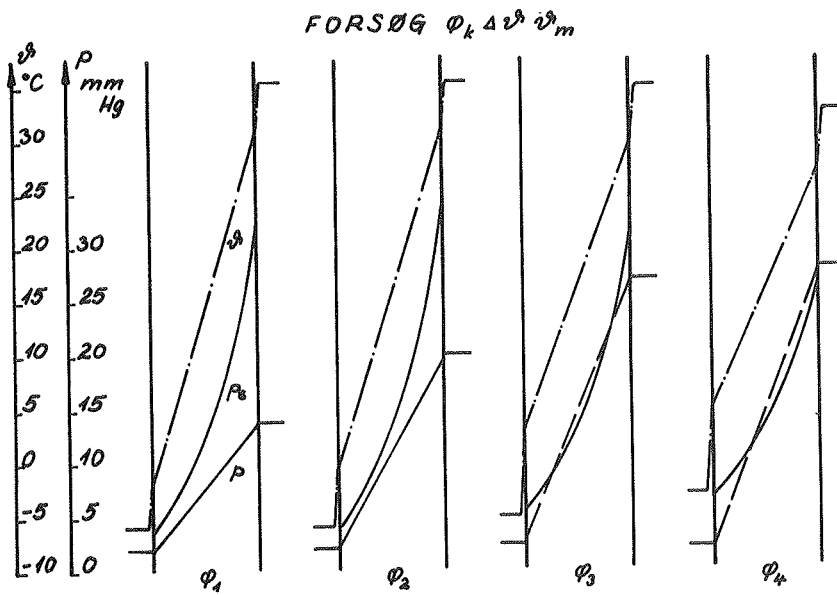


Fig. 59H

Kun i tilfældene φ_1 og φ_2 er damptrykkurven med sikkerhed retlinet, og kun i disse tilfælde vil måleresultaterne (fugtstrøm divideret med damptrykforskel) således altid være udtryk for det egentlige diffusionstal. Da en stabil tilstand i fugtgennemgangen imidlertid også syntes indtruffet i de øvrige tilfælde, hvor den sandsynligvis er et samspil mellem kapillarbevægelse og diffusion, understreges det endnu engang, at måleresultaterne blot giver udtryk for de tilsyneladende diffusionstal.

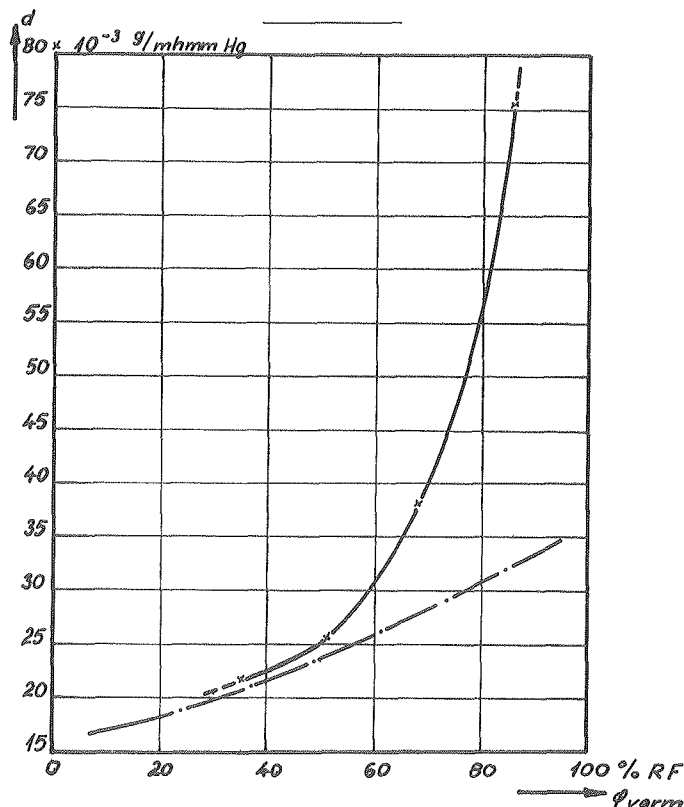


Fig. 60. Gennemsnit af målte tilsyneladende diffusionstal sammenlignet med isoterme målinger (blød træfiberplade).

Moyenne des perméabilités apparentes mesurées, comparée avec des mesures isothermes. (Fibre de bois).

Average of the measured apparent vapour permeabilities compared with isothermal measurements. (Wood fibre board).

Et overblik over de målte tilsyneladende diffusionstal giver fig. 60, der viser gennemsnittet af samtlige målinger. Til sammenligning er indtegnet den tidligere efter TVEIT gengivne kurve, der dog angiver diffusionstallet som funktion af den gennemsnitlige relative fugtighed på begge sider af prøvelegemet (jvf. afsnit 3.1.1). (Forskellene mellem disse angives at have beløbet sig til 12-20% RF.). Det konstateres, at målingerne under samtidig indvirken af en temperaturgradient har givet meget væsentligt større værdier for diffusionstallet ved højere fugtniveauer. Endvidere bemærkes, at de største måleværdier har samme størrelsesorden som stillestående luftlags diffusionstal (D).

Tabel 18 angiver middeltallet af måleresultaterne med faktoren på højt, henholdsvis lavt niveau. Det synes heraf at fremgå, at lavere $\Delta\theta$ medfører lavere tilsyneladende diffusionstal, mens det omvendte er tilfældet for θ_m .

Lavere relativ fugtighed på den kolde side medfører større diffusionstal for φ_1 , φ_2 og φ_3 ; dette er i overensstemmelse med hvad man kunne vente, idet den kapillare tilbagesugning bliver mindre. Den omvendte virkning synes derimod at gøre sig gældende for φ_4 .

Angående de enkelte faktorvirkninger refereres iøvrigt til den videre behandling...

Materialeprøver på $8 \times 8 \times 1,3 \text{ cm}^3$ var under forsøgene anbragt i de enkelte plexiglaskasser. Herved blev de hygroskopiske fugtindhold bestemt. Resultatet fremgår af fig. 61.

I figuren er indtegnet én kurve for temperaturerne 25, 30 og 35°C. Det var ikke muligt at skelne nogen temperaturafhængighed i dette ret snævre interval. En lignende bemærkning gælder for kurve 2 - for de kolde temperaturer.

Kurve 3 viser den af TVEIT [42] angivne sorptionskurve for blød træfiberplade ($\rho_0 = 215 \text{ kg/m}^3$) ved 25°C.

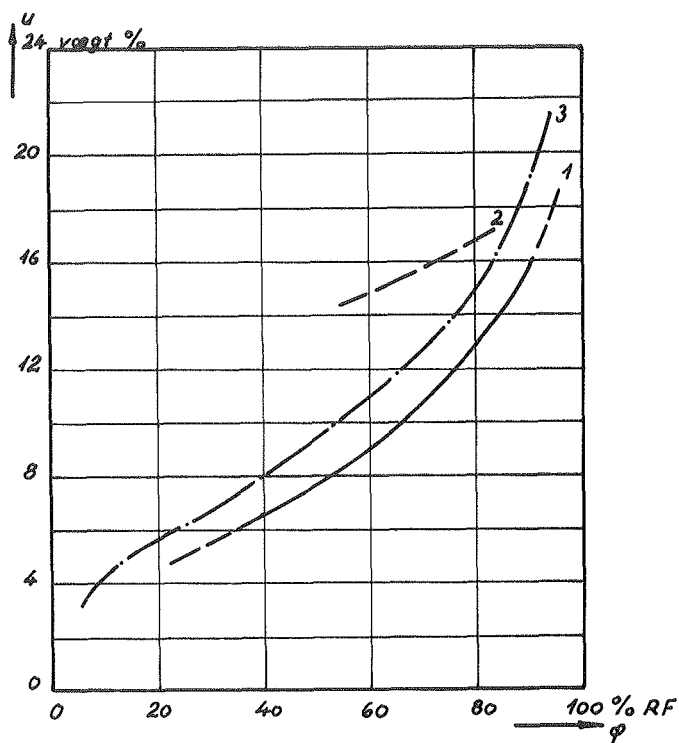


Fig. 61. Sorptionskurver for blød træfiberplade.

1: 230 kg/m^3 , $25-35^\circ\text{C}$. 2: 230 kg/m^3 , $-10-0^\circ\text{C}$.
 3: 215 kg/m^3 , 25°C . (Efter TVEIT).

Courbes de sorption de fibre de bois.

Sorption curves of wood fibre board.

Tabel 18. Middeltal af måleresultater
[10^{-3} g/mhmmHg]. (Blød træfiberplade.)

| Virkning | φ_{varm} | | | |
|-----------------------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | φ_1 | φ_2 | φ_3 | φ_4 |
| φ_{kold} høj | 21,9 | 25,1 | 37,4 | 80,5 |
| - lav | 22,1 | 26,6 | 39,3 | 70,7 |
| $\Delta\vartheta$ høj | 22,4 | 26,8 | 41,1 | 83,0 |
| - lav | 21,6 | 25,0 | 35,6 | 68,1 |
| ϑ_m høj | 22,0 | 24,8 | 37,7 | 72,6 |
| - lav | 22,0 | 26,9 | 39,1 | 78,5 |
| middel | 22,0 | 25,9 | 38,4 | 75,6 |

Tabel 19. Variansanalyse af samtlige målinger
(blød træfiberplade).

| Variation | SAK | f | s^2 | F |
|---|----------|-----|---------|---------|
| mell. prøver | 118,98 | 3 | 39,66 | 9,96 |
| Virkning φ_{varm} | 13004,68 | 3 | 4334,89 | 1089,17 |
| - $\Delta\vartheta$ | 241,67 | 1 | | 60,72 |
| - ϑ_m | 39,50 | 1 | | 9,92 |
| - $\Delta\vartheta \vartheta_m$ | 0,01 | 1 | | ~0 |
| - φ_{kold} | 17,01 | 1 | | 4,27 |
| - $\varphi_k \Delta\vartheta$ | 3,75 | 1 | | 0,94 |
| - $\varphi_k \vartheta_m$ | 15,74 | 1 | | 3,96 |
| - $\varphi_k \vartheta_m \Delta\vartheta$ | 54,92 | 1 | | 13,80 |
| Forsøgsfejl | 581,62 | 146 | 3,98 | |
| Ialt | 14077,88 | 159 | | |

Tabel 20. Variansanalyse af forsøgsfejl (blød
træfiberplade).

| Variation | SAK | f | s^2 | F |
|-------------|--------|-----|-------|-------|
| Rest | 400,02 | 18 | 22,22 | 15,64 |
| Gentagelser | 181,60 | 128 | 1,42 | |
| Ialt | 581,62 | 146 | | |

Tabel 21A: Variansanalyse for φ_1 (blød træfiberplade).

| Virkning | SAK | f | s ² |
|---------------------------------------|-------|----|----------------|
| $\Delta\vartheta$ | 0,83 | 1 | |
| ϑ_m | 0 | 1 | |
| $\Delta\vartheta\vartheta_m$ | 1,88 | 1 | |
| φ_k | 0,12 | 1 | |
| $\varphi_k\Delta\vartheta$ | 2,03 | 1 | |
| $\varphi_k\vartheta_m$ | 1,84 | 1 | |
| $\varphi_k\Delta\vartheta\vartheta_m$ | 2,39 | 1 | |
| Forsøgsfejl | 14,09 | 32 | 0,44 |
| Ialt | 23,18 | 39 | |

Tabel 21B: Variansanalyse for φ_2

| Virkning | SAK | f | s ² |
|---------------------------------------|-------|----|----------------|
| $\Delta\vartheta$ | 6,26 | 1 | |
| ϑ_m | 8,98 | 1 | |
| $\Delta\vartheta\vartheta_m$ | 0,46 | 1 | |
| φ_k | 3,88 | 1 | |
| $\varphi_k\Delta\vartheta$ | 4,84 | 1 | |
| $\varphi_k\vartheta_m$ | 0,76 | 1 | |
| $\varphi_k\Delta\vartheta\vartheta_m$ | 4,00 | 1 | |
| Forsøgsfejl | 24,20 | 32 | 0,76 |
| Ialt | 53,38 | 39 | |

Tabel 21C: Variansanalyse for φ_3

| Virkning | SAK | f | s ² |
|---------------------------------------|--------|----|----------------|
| $\Delta\vartheta$ | 56,55 | 1 | |
| ϑ_m | 3,34 | 1 | |
| $\Delta\vartheta\vartheta_m$ | 2,40 | 1 | |
| φ_k | 5,96 | 1 | |
| $\varphi_k\Delta\vartheta$ | 28,63 | 1 | |
| $\varphi_k\vartheta_m$ | 31,90 | 1 | |
| $\varphi_k\Delta\vartheta\vartheta_m$ | 29,58 | 1 | |
| Forsøgsfejl | 20,26 | 32 | 0,63 |
| Ialt | 178,62 | 39 | |

Tabel 21D: Variansanalyse for φ_4

| Virkning | SAK | f | s ² |
|---------------------------------------|--------|----|----------------|
| $\Delta\vartheta$ | 406,28 | 1 | |
| ϑ_m | 60,03 | 1 | |
| $\Delta\vartheta\vartheta_m$ | 0,48 | 1 | |
| φ_k | 168,92 | 1 | |
| $\varphi_k\Delta\vartheta$ | 25,03 | 1 | |
| $\varphi_k\vartheta_m$ | 0,00 | 1 | |
| $\varphi_k\Delta\vartheta\vartheta_m$ | 34,08 | 1 | |
| Forsøgsfejl | 123,20 | 32 | 3,85 |
| Ialt | 818,02 | 39 | |

5.5.1.2. Bearbejdelse og diskussion af måleresultater

Variansanalyser

En variansanalyse af måleresultaterne i tabel 16 er gengivet i tabel 19. Det fremgår heraf, at φ_{varm} har stærkt signifikant indflydelse på diffusionstallet, ligeledes synes de valgte ændringer i temperaturforskellene at have haft stærkt signifikant virkning; en variation af temperaturniveauet inden for de valgte - ret snævre - grænser viser signifikant indflydelse, mens endelig de to forskellige φ_{kold} -niveauer kun synes at have haft svagt signifikant indflydelse på diffusionstallet. Endvidere bemærkes, at variationen mellem prøvelegemerne er signifikant; det har da også vist sig, at materialet til prøvelegeme IV stammede fra en anden leverance, der gennemsnitligt har givet noget højere diffusionstal. Kvadratafvigelsessummen for prøvelegemerne I, II og III er således: $\text{SAK} = 0,10$!

Samspilseffekternes eventuelle signifikans skal ikke diskuteres, da deres virkning ikke direkte kan tolkes.

Variansanalysen i tabel 19 er formentlig ikke helt berettiget, idet varianserne er ret inhomogene (jvf. tabel 16). Sammenlignes den samlede forsøgsfejl med variationen p.gr. af gentagne målinger (tabel 20) ses endvidere, at den samlede "forsøgsfejl" er signifikant større end blot forklaret gennem almindelig måleusikkerhed. I det følgende behandles de enkelte φ_{varm} derfor særskilt...

Tabel 21A-D viser variansanalyser for faktorvirkningerne ved henholdsvis φ_1 , φ_2 , φ_3 og φ_4 . Heraf fremgår standardafvigelserne s. Varianskvotienten F er ikke beregnet, idet det anses for mere oplysende i forbindelse med en beregning af de enkelte virkninger størrelsesorden at angive konfidensgrænserne, dvs. de grænser indenfor hvilke virkningerne med en given sandsynlighed vil ligge (jvf. nedenstående afsnit).

Faktorvirkninger

Virkningerne af de påtrykte faktorændringer fås som differensen mellem summen af måleresultater (tabel 16) med faktoren på højt niveau og de tilsvarende med lavt faktorniveau multipliceret med faktoren 1/20 (fem gentagelser af hver måling). Resultatet fremgår af tabel 22 (kolonne 6), der tillige angiver den tilsvarende gennemsnitlige ændring i faktorniveauet (kolonne 5). Kolonne 7 viser de på grundlag af standardafvigelserne beregnede 90%-konfidensgrænser. Endelig er i tabellens kolonne 8 vist virkningernes relative

Tabel 22. Faktorvirkninger (blød træfiberplade).

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-------------------------|----------------|--------|------|---------|---------------------|--------------|------------------------|
| φ_{varm} | Faktor | Niveau | | | Virkn. (g/døgnmmHg) | | Sandsynlig, rel.virkn. |
| | | højt | lavt | ændring | målt | konfidensgr. | |
| φ_1 | $\Delta\theta$ | 30,7 | 25,3 | +5,4deg | 0,29 | $\pm 0,36$ | 3 \pm 4 (%) |
| | θ_m | 14,3 | 10,9 | +3,4°C | 0,00 | $\pm 0,36$ | 0 \pm 4 (%) |
| | φ_k | 85 | 66 | +19%RF | -0,11 | $\pm 0,36$ | -1 \pm 4 (%) |
| φ_2 | $\Delta\theta$ | 29,8 | 23,8 | +6,0deg | 0,79 | $\pm 0,47$ | 7 \pm 4,5 (%) |
| | θ_m | 14,9 | 11,2 | +3,7°C | -0,95 | $\pm 0,47$ | -8,5 \pm 4,5 (%) |
| | φ_k | 85 | 66 | +19%RF | -0,63 | $\pm 0,47$ | -5,5 \pm 4,5 (%) |
| φ_3 | $\Delta\theta$ | 27,4 | 23,8 | +3,6deg | 2,38 | $\pm 0,43$ | 14,5 \pm 2,5 (%) |
| | θ_m | 15,0 | 11,0 | +4,0°C | -0,58 | $\pm 0,43$ | -3,5 \pm 2,5 (%) |
| | φ_k | 85 | 66 | +19%RF | -0,77 | $\pm 0,43$ | -4,5 \pm 2,5 (%) |
| φ_4 | $\Delta\theta$ | 23,2 | 18,9 | +4,3deg | 6,38 | $\pm 1,05$ | 20 \pm 3,5 (%) |
| | θ_m | 15,8 | 11,8 | +4,0°C | -2,45 | $\pm 1,05$ | -7,5 \pm 3,5 (%) |
| | φ_k | 85 | 66 | +19%RF | +4,11 | $\pm 1,05$ | +12,5 \pm 3,5 (%) |

betydning, dvs. den absolutte størrelse af virkningen divideret med det i de 8 forsøg bestemte, gennemsnitlige diffusionstal. Det ses, at kun for φ_2 , φ_3 og φ_4 er faktorernes indflydelse signifikante på 90%-niveau.

Fig. 62A-C viser de sandsynlige (relative) virkninger af de enkelte faktorændringer i funktion af den relative fugtighed på den varme side.

Fig. 62A viser, at en ændring i temperaturforskellen over prøvelegemet på ca. 5 deg har jævnt stigende indflydelse på det tilsyneladende diffusionstal for stigende φ_{varm} og dermed for stigende fugtindhold.

For fugtindhold over en vis størrelse skønnes en konstant virkning på ca. -5% ved en forøgelse af temperaturniveauet på omkring 5°C, (fig. 62B). Dette svarer ret nøje til viskositetsændringen for vand (jvf. afsnit 2.3.3), og man kan altså heraf slutte, at temperaturniveauet hovedsageligt har indflydelse på kapillarbevægelsen (modsat rettet temperaturfaldet) og ikke på diffusionen. (Den modsat rettede væskebevægelse bliver større, dvs. det tilsyneladende diffusionstal bliver mindre ved højere temperatur.)

Dette falder nøje i tråd med fig. 62C, der netop giver udtryk for den kapillare tilbagesugning. Det ses, at denne virkning begynder ved samme fugtniveau som ϑ_m 's virkning.

En ændring i den relative fugtighed på den kolde side på ca. +20% RF vil betyde ca. 5% lavere diffusionstal, når materialets fugtindhold overskrider en vis grænse. For lave fugtindhold er den kapillare tilbagesugning formentlig nul.

At virkningen "skifter fortegn" ved højt fugtniveau er i åbenbar modstrid med hypotesen om en fugtdiffusion i dampform fra højere mod lavere damptryk overlejret af en væskebevægelse fra højere mod lavere relativ fugtighed.

Som det fremgår af fig. 59 har der imidlertid ved φ_4 fundet overfladekondensation sted. Forudsætningen for beregning

af et diffusionstal er altså langt fra reelt til stede, og det kan formentlig konstateres, at fugttransporten ved høj relativ fugtighed (og overfladekondens) foregår ved en ganske anden mekanisme end egentlig antaget.

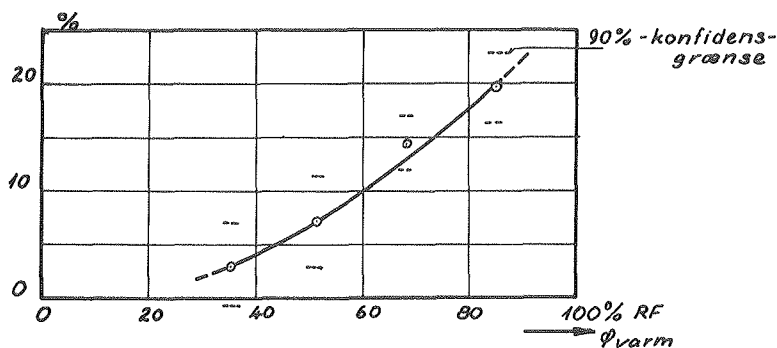


Fig. 62A

Fig. 62A-C. Virkninger på det tilsyneladende diffusionstal ved de påtrykte ændringer i temperaturforskul (fig. 62A), temperaturniveau (fig. 62B) og rel. fugtighed på den kolde side (fig. 62C).

Effets sur la perméabilité apparente des modifications appliquées. A: Changement de la différence de température. B: Changement du niveau de la température. C: Changement de l'humidité relative du côté froid. (Fibre de bois).

The effects on the apparent vapour permeability of the applied modifications. A: Higher temperature difference. B: Higher temperature level. C: Higher relative humidity on the cold side. (Wood fibre board.)

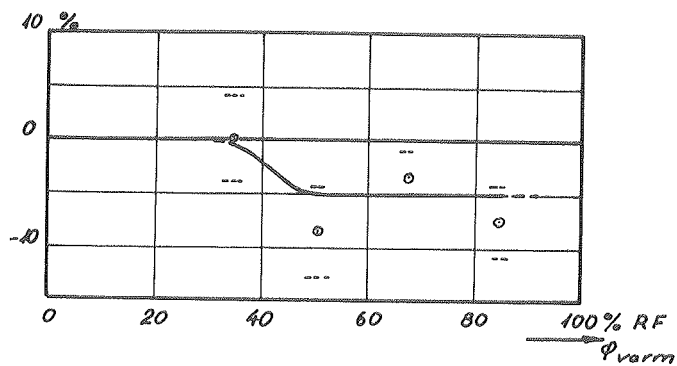


Fig. 62B

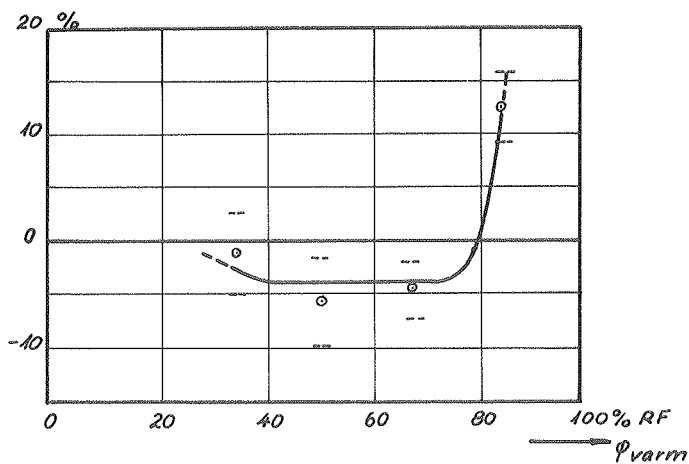


Fig. 62C

Virkningskoefficienter

De foreliggende forsøg angiver kun mål for de lineære virkninger af faktorerne $\Delta\vartheta$, ϑ_m og φ_{kold} , og virkningerne er yderligere bestemt på grundlag af ret små faktorændringer.

Med basis i forsøgsresultaterne kan fugttransporten beskrives ved:

$$\begin{aligned}
 g &= d_{\text{kor}} \times \Delta p/e \\
 &= d(1 + k_{\Delta\vartheta} \Delta\vartheta/e)(1 + k_{\vartheta_m}(\vartheta_m - \vartheta_{\text{ref}}))(1 + k_{\Delta\varphi}(\varphi_{\text{kold}} - \varphi_{\text{var}})/e) \\
 &\quad \times \Delta p/e,
 \end{aligned}$$

hvor d_{kor} er et korrigeret diffusionstal og k med index angiver virkningskoefficienten.

d er et diffusionstal, der afhænger af fugtindholdet, og som formentlig bør sættes lig det ved isoterme målinger fundne, hvis dette, vel at mærke, er korrigeret for kapillarbevægelsen p.gr. af forskelle i den relative fugtighed (jvf. afsnit 3.1.1). Endelig angiver ϑ_{ref} et referencetemperatur-niveau.

Virkningskoefficienterne kan beregnes på grundlag af de fundne virkninger divideret med de tilsvarende faktorændringer samt med et skønnet "isotermt diffusionstal". De således beregnede koefficienter samt det sandsynlige forløb i funktion af φ_{var} er vist i fig. 63A, B og C. Virkningskoefficienterne gælder selvfølgelig à priori kun inden for de intervaller, hvori de er bestemt. Når man i det følgende forsøger at generalisere de fundne resultater, må konklusionerne altså betragtes med det forbehold, som en extrapolation af en lineær approximation naturligt kræver...

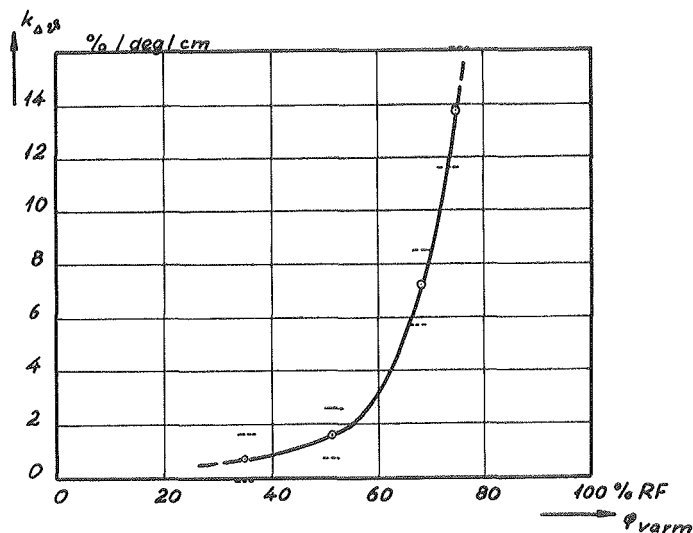


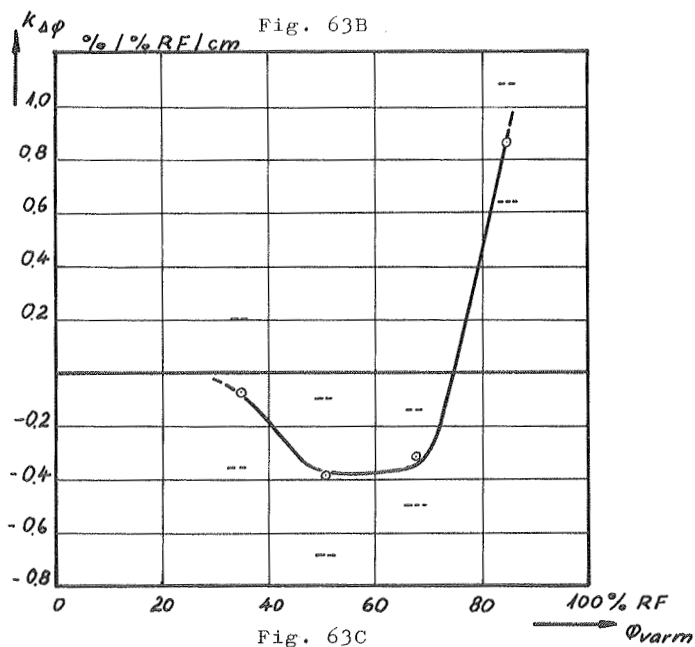
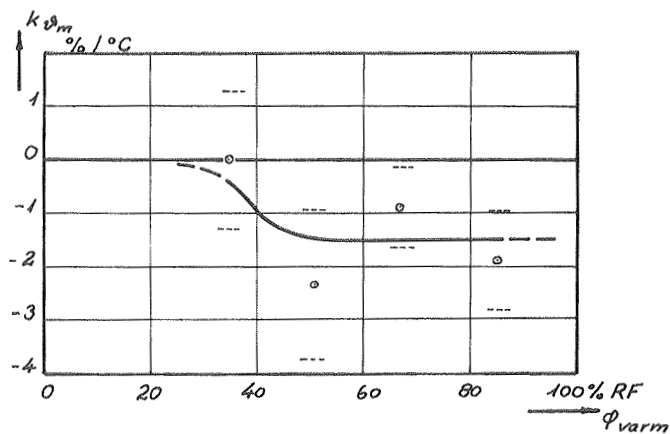
Fig. 63A

Fig. 63. Virkningskoefficienter for A: temperaturgradient, B: temperaturniveau, C: rel. fugtighedsgradient. (Blød træfiberplade.)

Influence sur la perméabilité à la vapeur A: d'un gradient de température, B: du niveau de la température, C: d'un gradient d'humidité relative. (Fibre de bois.)

The influence on the vapour permeability of A: the temperature gradient, B: the temperature level and C: the relative humidity-gradient. (Wood fibre board.)

Virkningskoefficienten $k_{\Delta\theta}$ (fig. 63A) for lavere (hygroskopiske) fugtindhold skønnes at variere fra ca. 0,5 til 2%/deg/cm. Da praktisk forekommende temperaturgradienter vel aldrig vil overskride f.eks. 10 deg/cm, vil en korrektion for temperaturgradientens indflydelse på diffusionstallet normalt være unødvendig ved disse fugtindhold. Ved højere værdier af ϕ_{varm} , der medfører kondens i materialet og dermed væsentlig højere fugtindhold, har temperaturgradienten derimod øjensynlig en kraftig indflydelse på den samlede fugttransport.



Forsøgsresultaterne lader - som fig. 63B viser - formode, at en ændring i temperaturniveauet har en konstant indflydelse på det tilsyneladende diffusionstal, når fugtindholdet

er over en vis størrelse. Virkningen (ca. $-1,5\%$ pr. $^{\circ}\text{C}$ stigning) er imidlertid af en sådan størrelsesorden, at man normalt kan se bort fra den.

Virkningskoefficienten for forskelle i den relative fugtighed på de to sider af materialet vil maksimalt beløbe sig til ca. $-0,35\%/1\%$ RF/cm. Under almindelige forhold, hvor forskellen mellem de relative fugtigheder vel sjældent overstiger ca. 30% RF pr. cm, vil kapillarbevægelsen altså højst betyde en ændring i det tilsyneladende diffusionstal på ca. 10% , hvilket vil kunne negligeres. Målinger af diffusionstallet ved "cup"-metoden vil ofte medføre større fugtgradienter, hvorfor resultaterne herfra altså bør korrigeres.

Overfladekondensation

I tilfældene $\varphi_{\text{varm}} = \varphi_4$, hvor overfladekondens forekom, blev hele den fra skålene afgivne vandmængde absorberet af prøvelegemerne. Den samme mængde blev øjensynligt afgivet på den kolde side. En kvalitativ forklaring på fugttransporten i dette tilfælde er følgende: Fugten akkumuleres (hovedsageligt ved diffusion?) i den varme side af prøvelegemet indtil fugtkoncentrationen er en sådan, at en væskebevægelse mod den kolde side holder ligevægt med den tilførte fugtmængde. Fugttransporten gennem materialet formodes altså i hovedsagen at være en væskebevægelse. *)

Den fugtmængde, der maksimalt pr. tidsenhed ved diffusion kan trænge ind i materialet er (jvf. afsnit 4.2.5.2) givet ved:

$$g = \frac{\partial p_s}{\partial \vartheta} \frac{\Delta \vartheta}{e} d \quad (13)$$

Ud fra de foretagne målinger af temperaturforhold samt absorberet fugtmængde pr. tidsenhed beregnes v.h.j. af formlen middelværdien af de tilsyneladende diffusionstal til $d_m = 50 \times 10^{-3}$ g/mhmmHg med en standardafvigelse på $s = 13 \times 10^{-3}$ g/mhmmHg.

*) ... hvilket dog er i strid med ϑ_m 's indflydelse, jvf. afsnit 5.6.

Ses bort fra målingerne for prøvelegeme IV, er de tilsvarende tal: $d_m = 43 \times 10^{-3} \text{ g/mhmmHg}$; $s = 3 \times 10^{-3} \text{ g/mhmmHg}$.

Denne homogenitet i resultaterne kan ses som bevis på, at det - som tidligere fremsat - er muligt v.hj. af formelen (13) at beregne den fugtmængde, der maksimalt ved diffusion kan trænge ind i et materiale. For diffusionstallet d skal benyttes en værdi gældende for ret fugtigt materiale.

Beregning af fugtledningstallet

Den samlede fugttransport i tilfældene $\varphi_{\text{varm}} = \varphi_1, \varphi_2$ og φ_3 kan som tidligere omtalt beskrives ved ligningen:

$$g = -d \frac{\partial p}{\partial x} - k \rho_0 \frac{\partial u}{\partial x}.$$

Forudsættes diffusionstallet nogenlunde konstant for de enkelte φ_{varm} -værdier uanset φ_{kold} , kan et overslag over fugtledningstallet k 's størrelsesorden fås af:

$$d_{\text{målt}}^{66} - d_{\text{målt}}^{85} \approx k \rho_0 \left(\frac{1}{\Delta p} \right)_m (u^{85} - u^{66}),$$

hvor $d_{\text{målt}}$ angiver de tilsyneladende diffusionstal og $(\Delta p)_m$ den gennemsnitlige partielle damptrykforskel. Det erindres, at φ_{kold} i middel har været 85 henh. 66% RF.

Af sorptionskurven (fig. 61) fås: $u^{85} - u^{66} \approx 2 \text{ vægt\%} = 20 \text{ g/kg}$.

På grundlag af fig. 62B beregnes således følgende k -værdier:

$$\varphi_1: \quad k \sim 0,6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$$

$$\varphi_2: \quad k \sim 1,4 \times 10^{-6} \quad -$$

$$\varphi_3: \quad k \sim 2,8 \times 10^{-6} \quad -$$

Kendskab til andres bestemmelser af fugtledningstallet haves desværre ikke. Forfatteren har på grundlag af udtørningsforsøg ved 20°C, 65% RF for samme materiale fundet:

$$k \sim 3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h} \text{ (jvf. afsnit 3.3)}.$$

5.5.2. Materiale: Gasbeton

$$e = 5 \text{ cm; tør rumvægt: } \rho_0 = 730 \text{ kg/m}^3$$

5.5.2.1. Målinger

Da indsvingningstiden for dette materiale - i relativt stor tykkelse - er forholdsvis langvarig, er hvert prøvelegeme ved hvert forsøg blevet underkastet samme relative fugtighed på den varme side.

Da den pr. døgn transporterede fugtmængde endvidere er ret lille ved de lavere relative fugtigheder, er vejninger af saltopløsningerne foretaget hvert andet døgn, og dampgennemgangstallene bestemt på grundlag af tre målinger efter ligevægts indtræden.

Tabel 23 viser måleresultaterne udtrykt i g/døgn/mmHg.

De til dampgennemgangstallene svarende diffusionstal (i g/mhmmHg) fås ved multiplikation med faktoren:

$$1/24 \times 1/0,48 \times 1/0,48 \times 0,05 = 9,05 \times 10^{-3}.$$

I tabel 24 er vist de gennemsnitligt målte temperaturer og fugtigheder samt temperaturforskellene over prøvelegemerne og middelværdierne af temperaturerne i disse.

Som i de under afsnit 5.5.1 omtalte forsøg blev anvendt mættede opløsninger af henholdsvis MgCl_2 og $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_3$ til ϕ_1 og ϕ_2 .

Tabel 23. Målinger af dampgennemgangstal (g/døgn/mmHg)
(gasbeton).

| Forsøg | φ_1 | φ_2 | φ_3 | φ_4 |
|-----------------------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| S | 3,34 | 4,19 | 39,03 | 62,08 |
| (1) SAK | 0,506 | 0,191 | 0,867 | 3,681 |
| S/n | <u>1,11</u> | <u>1,40</u> | <u>13,01</u> | <u>20,69</u> |
| S | 4,75 | 3,75 | 44,73 | 67,84 |
| $\Delta\vartheta$ SAK | 0,025 | 0,125 | 2,061 | 6,341 |
| S/n | <u>1,58</u> | <u>1,25</u> | <u>14,91</u> | <u>22,61</u> |
| S | 3,56 | 3,30 | 19,10 | 43,85 |
| ϑ_m SAK | 0,008 | 0,102 | 15,248 | 1,626 |
| S/n | <u>1,19</u> | <u>1,10</u> | <u>6,37</u> | <u>14,62</u> |
| S | 3,37 | 4,51 | 54,66 | 72,75 |
| $\Delta\vartheta_m$ SAK | 0,081 | 0,043 | 0,522 | 2,815 |
| S/n | <u>1,12</u> | <u>1,50</u> | <u>18,22</u> | <u>26,25</u> |
| S | 2,98 | 4,72 | 38,22 | 42,91 |
| φ_k SAK | 0,083 | 0,881 | 7,437 | 1,126 |
| S/n | <u>0,99</u> | <u>1,57</u> | <u>12,74</u> | <u>14,30</u> |
| S | 3,41 | 4,09 | 52,97 | 61,61 |
| $\varphi_k \Delta\vartheta$ SAK | 0,004 | 0,020 | 18,208 | 10,401 |
| S/n | <u>1,14</u> | <u>1,36</u> | <u>17,66</u> | <u>20,54</u> |
| S | 3,22 | 3,48 | 25,38 | 48,75 |
| $\varphi_k \vartheta_m$ SAK | 0,047 | 0,049 | 4,355 | 0,146 |
| S/n | <u>1,07</u> | <u>1,16</u> | <u>8,46</u> | <u>16,25</u> |
| S | 3,42 | 4,44 | 44,78 | 59,37 |
| $\varphi_k \Delta\vartheta_m$ SAK | 0,135 | 0,116 | 1,849 | 3,372 |
| S/n | <u>1,14</u> | <u>1,48</u> | <u>14,93</u> | <u>19,79</u> |

Tabel 24. Gennemsnitlige forsøgsforhold (gasbeton).

| Forsøg | | φ_1 | | φ_2 | | φ_3 | | φ_4 | |
|------------------------------------|----------------------------|-------------|------|-------------|------|-------------|------|-------------|------|
| | | varm | kold | varm | kold | varm | kold | varm | kold |
| (1) | ϑ_{luft} | 23,8 | -5,5 | 23,4 | -6,2 | 21,3 | -5,8 | 21,9 | -5,8 |
| | ϑ_{probe} | 21,2 | -0,5 | 20,7 | -2,6 | 14,6 | 0,9 | 15,7 | 0,1 |
| | φ | 39 | 70 | 53 | 70 | 58 | 70 | 70 | 70 |
| | $\Delta\vartheta$ | 21,7 | | 23,3 | | 13,7 | | 15,6 | |
| | δ_m | 10,4 | | 9,1 | | 7,8 | | 7,9 | |
| $\Delta\vartheta$ | | 32,6 | -8,5 | 32,4 | -9,1 | 30,1 | -8,1 | 30,2 | -7,9 |
| | | 27,4 | -1,4 | 29,1 | -2,8 | 22,1 | 1,2 | 24,8 | 0,9 |
| | | 41 | 70 | 53 | 70 | 58 | 70 | 70 | 70 |
| | | 28,8 | | 31,9 | | 20,9 | | 23,9 | |
| | | 13,0 | | 13,2 | | 11,7 | | 12,9 | |
| δ_m | | 31,3 | 0,2 | 31,4 | -0,5 | 29,9 | 0,0 | 29,8 | -0,1 |
| | | 28,5 | 5,4 | 28,6 | 3,6 | 23,0 | 6,6 | 24,9 | 5,9 |
| | | 34 | 65 | 52 | 65 | 57 | 65 | 72 | 65 |
| | | 23,1 | | 25,0 | | 16,4 | | 19,0 | |
| | | 16,5 | | 16,1 | | 14,8 | | 15,4 | |
| $\Delta\vartheta\delta_m$ | | 37,4 | -4,8 | 37,1 | -5,6 | 34,8 | -5,0 | 34,9 | -4,6 |
| | | 32,0 | 2,3 | 32,2 | 0,6 | 26,0 | 4,9 | 26,3 | 3,4 |
| | | 32 | 65 | 52 | 65 | 52 | 65 | 64 | 65 |
| | | 29,7 | | 31,6 | | 21,1 | | 22,9 | |
| | | 17,4 | | 16,4 | | 15,5 | | 14,9 | |
| φ_k | | 24,9 | -4,8 | 24,4 | -5,3 | 22,8 | -5,2 | 23,0 | -4,8 |
| | | 22,9 | 0,3 | 21,0 | -1,0 | 17,0 | 2,5 | 19,7 | 2,1 |
| | | 31 | 90 | 48 | 90 | 63 | 90 | 72 | 90 |
| | | 22,6 | | 22,0 | | 14,5 | | 17,6 | |
| | | 11,6 | | 10,0 | | 9,8 | | 10,9 | |
| $\varphi_k\Delta\vartheta$ | | 31,0 | -9,2 | 31,0 | -9,7 | 27,8 | -9,3 | 28,8 | -8,7 |
| | | 28,1 | -2,0 | 27,2 | -3,7 | 21,6 | 0,8 | 23,5 | 2,0 |
| | | 30 | 85 | 54 | 85 | 63 | 85 | 68 | 85 |
| | | 30,1 | | 30,9 | | 20,8 | | 21,5 | |
| | | 13,1 | | 11,8 | | 11,2 | | 12,8 | |
| $\varphi_k\delta_m$ | | 31,3 | 0,6 | 31,1 | 0,1 | 29,5 | 0,2 | 29,8 | 0,3 |
| | | 29,3 | 6,2 | 27,9 | 4,3 | 23,3 | 7,2 | 24,8 | 5,9 |
| | | 32 | 95 | 50 | 95 | 53 | 95 | 70 | 95 |
| | | 23,1 | | 23,6 | | 16,1 | | 18,9 | |
| | | 17,8 | | 16,1 | | 15,3 | | 15,4 | |
| $\varphi_k\Delta\vartheta\delta_m$ | | 36,7 | -4,6 | 36,4 | -5,5 | 34,3 | -5,1 | 34,9 | -4,0 |
| | | 33,6 | 3,2 | 32,8 | 0,6 | 26,6 | 5,4 | 29,5 | 5,8 |
| | | 32 | 90 | 49 | 90 | 54 | 90 | 65 | 90 |
| | | 30,4 | | 32,2 | | 21,2 | | 23,7 | |
| | | 18,4 | | 16,7 | | 16,0 | | 17,7 | |

Middelværdier: $\overline{\varphi_1} = 34\%$ RF $\overline{\varphi_2} = 51\%$ - $\overline{\varphi_3} = 57\%$ - $\overline{\varphi_4} = 69\%$ - $\overline{\varphi_k} \approx 79\%$ RF $\overline{\Delta\vartheta} \approx 23$ deg $\overline{\delta_m} \approx 14^\circ\text{C}$

Indledende forsøg med rent vand i skålene medførte overfladekondens i så store mængder, at de ikke blev absorberet af materialet; det samme var tilfældet ved anvendelse af mættet vandig opløsning af KNO_3 ($\varphi \sim 90\%$ RF). Ved φ_4 anvendtes derfor NaCl, hvilket også medførte overfladekondens; men hele den kondenserede fugtmængde optoges af materialet.

φ_3 frembragtes af en blanding af NaCl og KNO_3 i mættet opløsning.

I alle tilfælde var den pr. tidsenhed fordampede fugtmængde konstant efter nogle dages forløb, og det kunne skønnes, at den samme mængde blev afgivet på den kolde side. Ved φ_3 og φ_4 havde prøvelegemerne et fugtigt udseende på den kolde side, mens dette kun var tilfældet ved φ_4 på den varme side.

Figurerne 64A-H viser de på grundlag af målingerne konstruerede damptrykkurver. I følge disse skulle kondens i prøvelegemet ved φ_3 normalt ikke være forekommet. Da overfladen ved den kolde side imidlertid tydeligvis var fugtig, må det på forhånd konstateres, at forbindelseslinien mellem de partielle damptryk på varm og kold side i hvert fald ikke i dette tilfælde er udtryk for den reelle damptrykkurve, selv om linien falder under mætningskurven. Iøvrigt gælder samme bemærkninger som tidligere knyttet til figurerne 59A-H.

FORSØG (1)

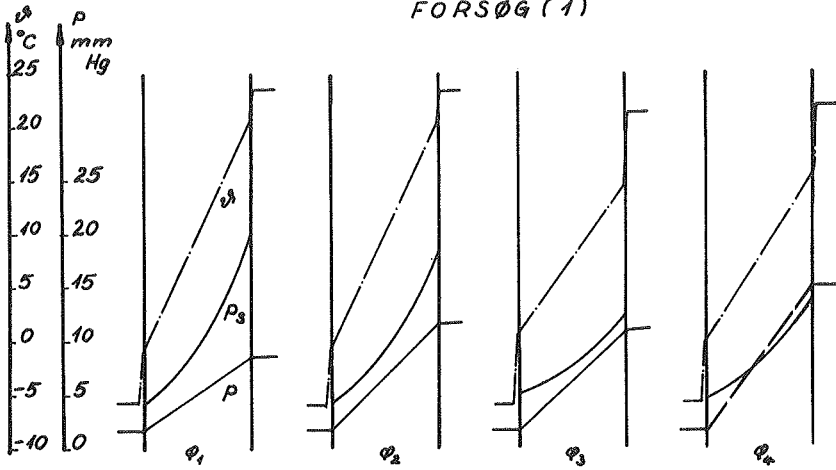


Fig. 64A

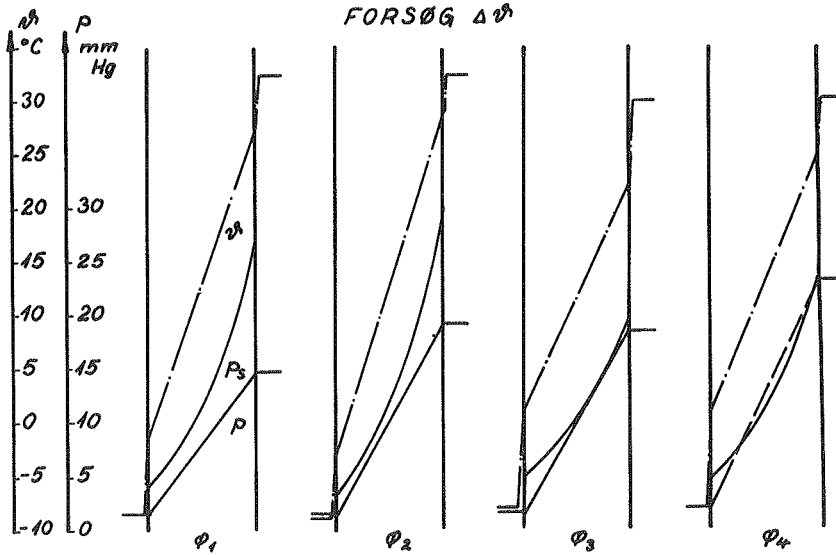


Fig. 64B

Fig. 64A-H. Forsøgsforhold ved fugtgennemgangsundersøgelserne for gasbeton.

Conditions d'essai pendant les mesures du transfert d'humidité en béton cellulaire.

Test conditions during the moisture transfer measurements on cellular concrete.

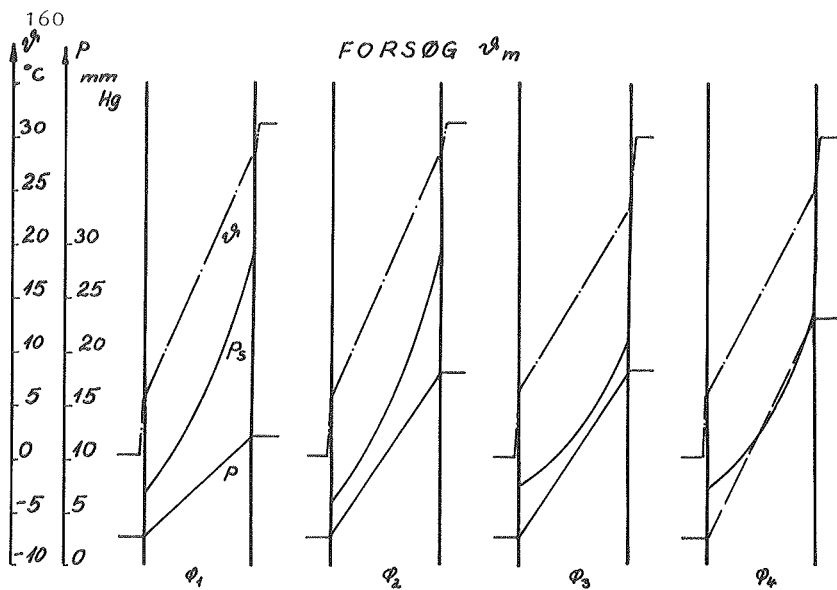


Fig. 64C

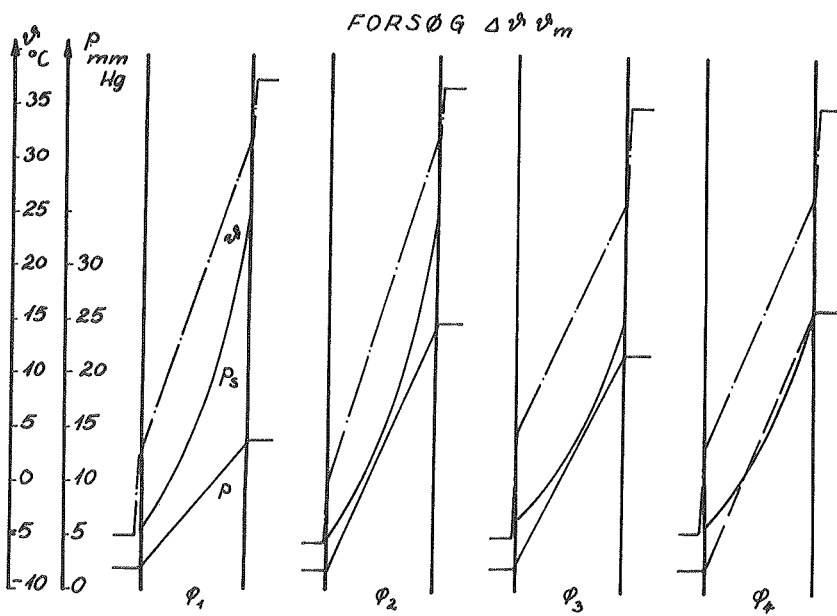


Fig. 64D

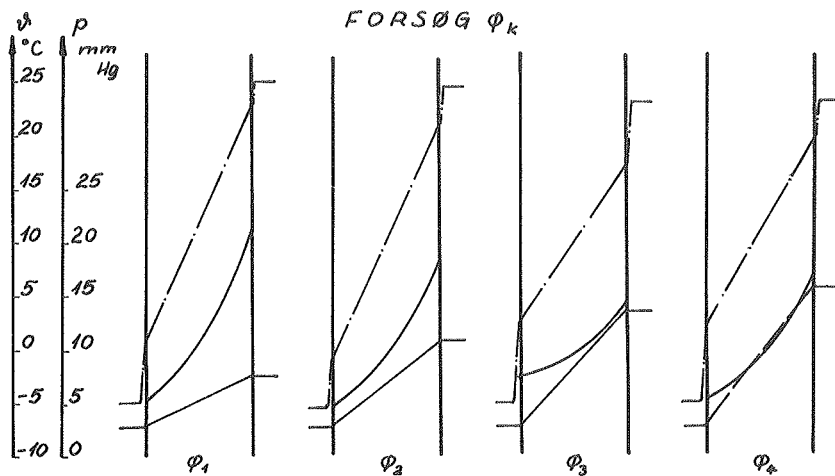


Fig. 64E

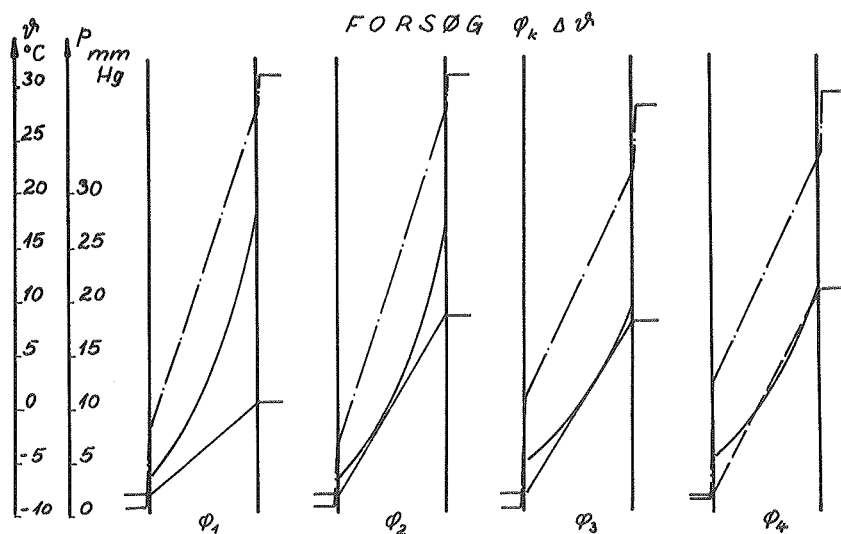


Fig. 64F

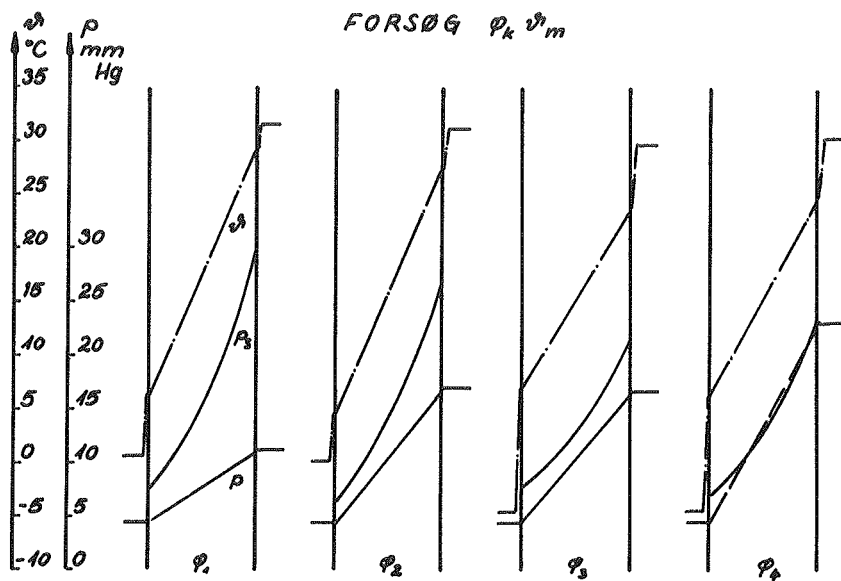


Fig. 64G

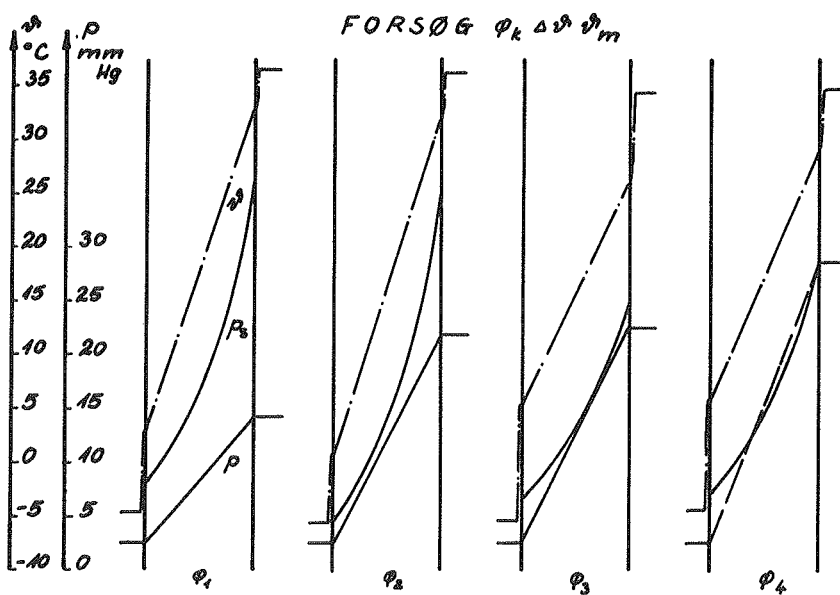


Fig. 64H

Fig. 65 viser gennemsnittet af de målte tilsyneladende diffusionstal. Til sammenligning er vist resultatet af TVEIT's isoterme målinger på en gasbeton med tør rumvægt $\rho_0 = 510 \text{ kg/m}^3$. Disse målinger er iøvrigt foretaget som omtalt i bemærkningerne til fig. 60. I fig. 65 er endvidere vist de tidligere omtalte (afsnit 3.1.2) målinger fra SBI, foretaget på 10 cm homogent materiale og med temperaturforskelle på 25, 35 og 45°C.

Der konstateres en endog meget betydelig stigning i det tilsyneladende diffusionstal for højere fugtniveauer. Stigningen forekommer formentlig samtidig med, at kondens indtræder i materialet.

Det bemærkes endvidere, at de tilsyneladende diffusionstal ved højere fugtniveauer ligger væsentlig over diffusionstallet for stillestående luftlag.

Tabel 25 viser middeltallene af målingerne med faktoren på højt, henholdsvis lavt niveau. Det kan heraf sluttes, at en højere temperaturgradient formentlig vil medføre højere diffusionstal, mens et højere temperaturniveau vil have den modsatte virkning. For ϕ_{kold} 's vedkommende kan ikke konstateres nogen tilsvarende, ensidig virkning. Faktorvirkningerne behandles mere indgående i det følgende.

Fig. 66, kurve 1 og 2 viser sorptionskurverne ved varme, henholdsvis kolde temperaturer, bestemt på materialeprøver af dimensionerne $1,5 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$. Til sammenligning er vist sorptionskurver for et lignende materiale, publiceret af KRISCHER [25] og TVEIT [42].

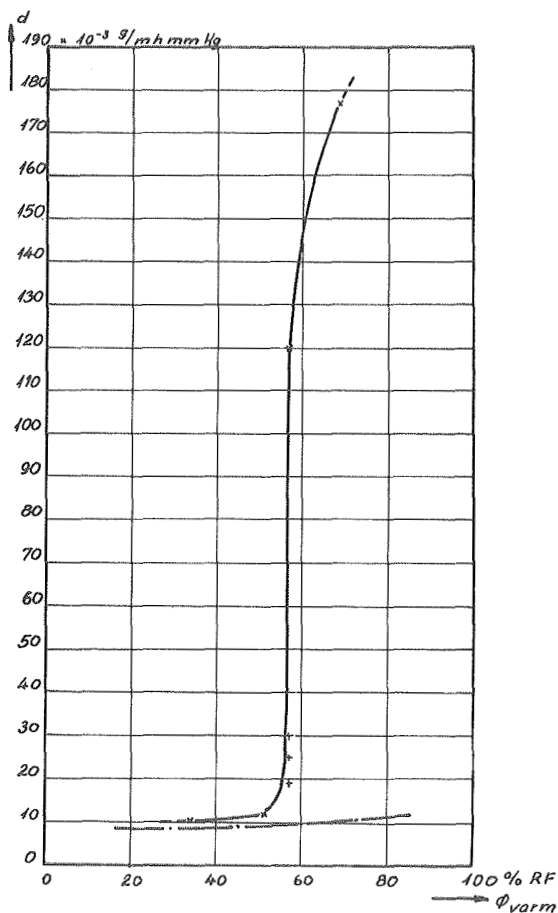


Fig. 65. Gennemsnit af målte tilsyneladende diffusionstal sammenlignet med isoterme målinger (gasbeton).
 x: egne målinger; +: SBI's målinger, $\rho_0 = 700 \text{ kg/m}^3$,
 $e = 10 \text{ cm}$.

Moyenne des perméabilités apparentes mesurées, comparée avec des mesures isothermes (Béton cellulaire).

Average of the measured apparent vapour permeability compared with isothermal measurements. Cellular concrete).

Tabel 25. Middeltal af måleresultater.
 $[10^{-3} \times \text{g/mhmmHg}]$ (Gasbeton).

| Virkning | φ_1 | $\varphi_2^{\varphi_{\text{varm}}}$ | φ_3 | φ_4 |
|--------------------|-------------|-------------------------------------|-------------|-------------|
| $\Delta\theta$ høj | 11,3 | 12,7 | 149 | 210 |
| $\Delta\theta$ lav | 9,9 | 11,9 | 92 | 149 |
| ϑ_m høj | 10,2 | 11,9 | 109 | 174 |
| ϑ_m lav | 10,9 | 12,6 | 132 | 177 |
| φ_k høj | 9,9 | 12,6 | 122 | 160 |
| φ_k lav | 11,3 | 11,9 | 119 | 190 |
| Middel | 10,6 | 12,2 | 120 | 177 |

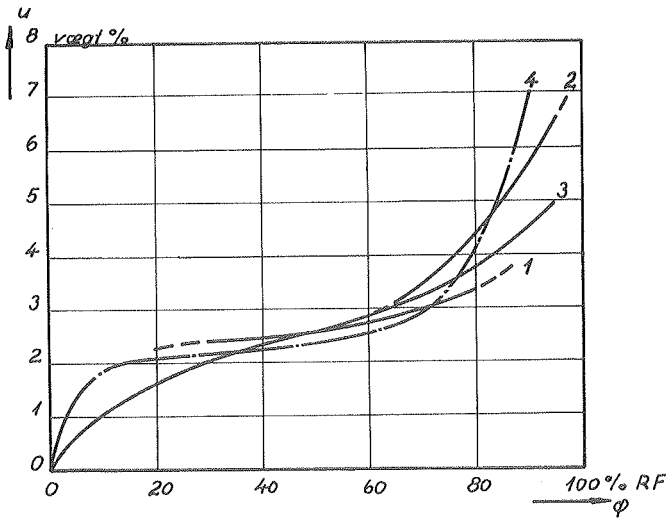


Fig. 66. Sorptionskurver for gasbeton. 1: 730 kg/m^3 , 25-35°C. 2: 730 kg/m^3 , -10-0°C. 3: 760 kg/m^3 , 50°C (after KRISCHER). 4: 510 kg/m^3 , 5-45°C (after TVEIT).

Courbes de sorption de béton cellulaire.

Sorption curves of cellular concrete.

5.5.2.2. Bearbejdelse og diskussion af måleresultater

Variansanalyser

En variansanalyse af samtlige målinger gengives i tabel 26. Det fremgår heraf, at de direkte virkninger af φ_{varm} og $\Delta\vartheta$ er stærkt signifikante, virkningen af forskellig ϑ_m er signifikant, mens de påtrykte variationer af φ_{kold} ikke synes at have haft signifikant indflydelse. Det har ikke med den valgte forsøgsplan været muligt at udskille prøvelegemernes variation.

Som omtalt i afsnit 5.5.1.2 er en sådan variansanalyse kun delvis berettiget, men kan muligvis tjene til en almindelig oversigt. I det følgende behandles de enkelte φ_{varm} således særskilt.

Variansanalyser for faktorvirkningerne ved φ_1 , φ_2 , φ_3 og φ_4 fremgår af tabel 27A-D. Imidlertid insisteres ikke yderligere herpå, da en angivelse af konfidensgrænserne som i den foregående behandling vil lette en tolkning af de fundne resultater.

Tabel 26: Variansanalyse af samtlige målinger (gasbeton).

| Variation | SAk | f | s ² | F |
|---|----------|----|----------------|--------|
| Virkning φ_{varm} | 5.771,41 | 3 | 1923,80 | 379,45 |
| - $\Delta\vartheta$ | 211,05 | 1 | | 41,63 |
| - ϑ_m | 18,97 | 1 | | 3,74 |
| - $\Delta\vartheta \vartheta_m$ | 27,07 | 1 | | 5,34 |
| - φ_{kold} | 10,05 | 1 | | 1,98 |
| - $\varphi_k \Delta\vartheta$ | 1,89 | 1 | | 0,37 |
| - $\varphi_k \vartheta_m$ | 0,45 | 1 | | 0,09 |
| - $\varphi_k \Delta\vartheta \vartheta_m$ | 31,65 | 1 | | 6,24 |
| Rest (forsøgsfejl) | 430,68 | 85 | 5,07 | |
| Ialt | 6503,22 | 95 | | |

Tabel 27A: Variansanalyse for φ_1 (gasbeton).

| Virkning | SAK | f | s ² |
|---------------------------------|-------|----|----------------|
| $\Delta\theta$ | 0,143 | 1 | |
| θ_m | 0,035 | 1 | |
| $\Delta\theta\theta_m$ | 0,140 | 1 | |
| φ_k | 0,165 | 1 | |
| $\varphi_k\Delta\theta$ | 0,015 | 1 | |
| $\varphi_k\theta_m$ | 0,083 | 1 | |
| $\varphi_k\Delta\theta\theta_m$ | 0,078 | 1 | |
| Forsøgsfejl | 0,889 | 16 | 0,056 |
| Ialt | 1,548 | 23 | |

Tabel 27B: Variansanalyse for φ_2

| Virkning | SAK | f | s ² |
|---------------------------------|-------|----|----------------|
| $\Delta\theta$ | 0,050 | 1 | |
| θ_m | 0,043 | 1 | |
| $\Delta\theta\theta_m$ | 0,437 | 1 | |
| φ_k | 0,040 | 1 | |
| $\varphi_k\Delta\theta$ | 0,008 | 1 | |
| $\varphi_k\theta_m$ | 0,024 | 1 | |
| $\varphi_k\Delta\theta\theta_m$ | 0,000 | 1 | |
| Forsøgsfejl | 1,529 | 16 | 0,096 |
| Ialt | 2,131 | 23 | |

Tabel 27C: Variansanalyse for φ_3

| Virkning | SAK | f | s ² |
|---------------------------------|--------|----|----------------|
| $\Delta\theta$ | 236,94 | 1 | |
| θ_m | 40,12 | 1 | |
| $\Delta\theta\theta_m$ | 49,62 | 1 | |
| φ_k | 0,61 | 1 | |
| $\varphi_k\Delta\theta$ | 2,10 | 1 | |
| $\varphi_k\theta_m$ | 5,07 | 1 | |
| $\varphi_k\Delta\theta\theta_m$ | 26,48 | 1 | |
| Forsøgsfejl | 50,58 | 16 | 3,16 |
| Ialt | 411,52 | 23 | |

Tabel 27D: Variansanalyse for φ_4

| Virkning | SAK | f | s ² |
|---------------------------------|--------|----|----------------|
| $\Delta\theta$ | 170,56 | 1 | |
| θ_m | 3,94 | 1 | |
| $\Delta\theta\theta_m$ | 9,45 | 1 | |
| φ_k | 47,83 | 1 | |
| $\varphi_k\Delta\theta$ | 1,19 | 1 | |
| $\varphi_k\theta_m$ | 11,93 | 1 | |
| $\varphi_k\Delta\theta\theta_m$ | 40,61 | 1 | |
| Forsøgsfejl | 29,51 | 16 | 1,84 |
| Ialt | 315,02 | 23 | |

Faktorvirkninger

De målte virkninger ved de påtrykte faktorændringer samt 90%-konfidensintervallerne fremgår af tabel 28, kolonne 6 og 7 samt kolonne 8, hvor virkningerne i forhold til de gennemsnitligt målte diffusionstal er beregnet.

Virkninger kan kun med sikkerhed spores for $\Delta\theta$ ved φ_3 og φ_4 samt for θ_m ved φ_3 og φ_{kold} ved φ_4 .

I fig. 67A-C er vist de sandsynlige relative virkninger i funktion af den relative fugtighed på den varme side. Heraf sluttes følgende:

En ændring af temperaturforskellen over prøvelegemet på ca. + 5 deg vil medføre en stigning i diffusionstallet på knapt 10%, når der ikke forekommer kondens i materialet (hygroskoppiske fugtindhold). Forekommer derimod kondens, er temperaturforskellens indflydelse stor: en ændring på ca. +4 deg har medført en stigning i det tilsyneladende diffusionstal af størrelsesordenen 35% (fig. 67A).

En ændring af temperaturniveauet på ca. +4°C har medført ca. 10% lavere diffusionstal. Dette er noget større end ændringen i vandets viskositet, men virkningen må hovedsageligt tilskrives væskebevægelsen, modsat rettet diffusionen (fig. 67B).

En ændring af den relative fugtighed på den kolde side fra 67,5 til 90% RF vil medføre ca. 8% lavere diffusionstal.

Også denne virkning kan forklares ved den kapillare tilbage-

Fig. 67 (modstående side). Virkninger på det tilsyneladende diffusionstal ved de påtrykte ændringer i temperaturforskel (fig. 67A), temperaturniveau (fig. 67B) og rel. fugtighed på den kolde side (fig. 67C).

Effets sur la perméabilité apparente des modifications appliquées. A: Changement de la différence de température. B: Changement du niveau de la température. C: Changement de l'humidité relative du côté froid. (Béton cellulaire).

The effects on the apparent vapour permeability of the applied modifications. A: Higher temperature difference. B: Higher temperature level. C: Higher humidity on the cold side. (Cellular concrete).

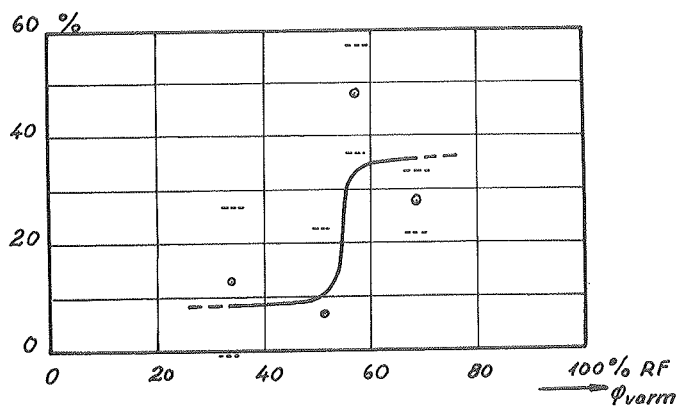


Fig. 67A

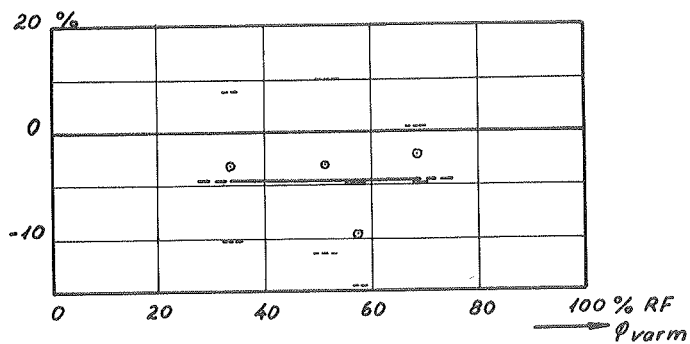


Fig. 67B

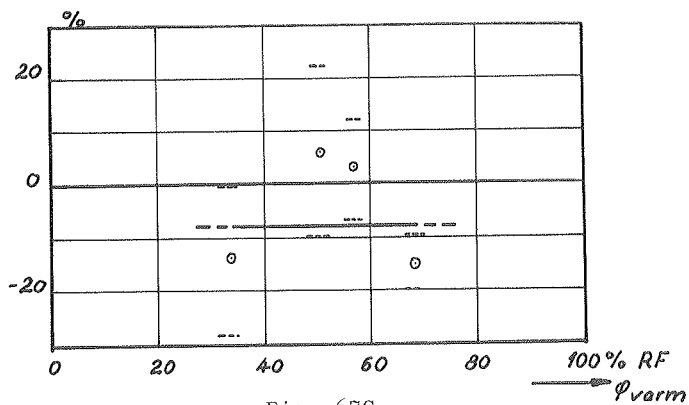


Fig. 67C

Virkningskoefficienter

Med de forbehold, som blev understreget under afsnit 5.5.1.2, kan man forsøge at generalisere de fundne resultater ved beregning af virkningskoefficienterne. For ϑ_m og φ_{kold} kan de med tilstrækkelig nøjagtighed beregnes af de fundne relative virkninger (tabel 28, kolonne 8) divideret med de tilsvarende faktorændringer (kolonne 5); da temperaturforskellen har meget væsentlig indflydelse ved tilfældene φ_3 og φ_4 (smlgn. fig. 65), er virkningskoefficienten for $\Delta\vartheta$ derimod i disse tilfælde beregnet af den absolute virkning (kolonne 6 + 7) i forhold til et skønnet "hygroskopisk diffusionstal", målt isotermt.

Tabel 28: Faktorvirkninger (gasbeton).

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 ° |
|-------------------------|-------------------|--------|------|----------|------------------------|--------------|------------------|
| φ_{varm} | Faktor | Niveau | | | Virkning (g/døgn mmHg) | | Sandsynlig |
| | | højt | lavt | ændring | målt | konfidensgr. | relativ virkning |
| φ_1 | $\Delta\vartheta$ | 29,8 | 22,6 | +7,2 deg | 0,15 | $\pm 0,17$ | 13 \pm 14 (%) |
| | ϑ_m | 17,5 | 12,0 | +5,5°C | -0,08 | $\pm 0,17$ | -6,5 \pm 14 |
| | φ_k | 90 | 67,5 | +22,5%RF | -0,17 | $\pm 0,17$ | -14 \pm 14 |
| φ_2 | $\Delta\vartheta$ | 31,7 | 23,5 | 8,2 deg | 0,09 | $\pm 0,22$ | 7 \pm 16 (%) |
| | ϑ_m | 16,3 | 11,0 | 5,3°C | -0,09 | $\pm 0,22$ | -6 \pm 16 |
| | φ_k | 90 | 67,5 | 22,5%RF | 0,08 | $\pm 0,22$ | 6 \pm 16 |
| φ_3 | $\Delta\vartheta$ | 21,0 | 15,2 | 5,8 deg | 6,3 | $\pm 1,3$ | 48 \pm 10 (%) |
| | ϑ_m | 15,4 | 10,1 | 5,3°C | -2,6 | $\pm 1,3$ | -19,5 \pm 10 |
| | φ_k | 90 | 67,5 | 22,5%RF | 0,3 | $\pm 1,3$ | 2,5 \pm 10 |
| φ_4 | $\Delta\vartheta$ | 23,0 | 17,8 | 5,2 deg | 5,3 | $\pm 1,0$ | 28 \pm 5 (%) |
| | ϑ_m | 15,9 | 11,1 | 4,8°C | -0,8 | $\pm 1,0$ | -4 \pm 5 |
| | φ_k | 90 | 67,5 | 22,5%RF | -2,8 | $\pm 1,0$ | -15 \pm 5 |

Med grundlag i de således beregnede virkningskoefficienter samt 90%-konfidensintervallerne er i figurerne 68 A,B og C vist den sandsynlige variation i afhængighed af φ_{varm} .

For lavere (hygroskopiske (?)) fugtindhold skønnes virkningskoefficienten for temperaturgradienten til ca. 5%/deg/cm (fig. 68A). Temperaturgradienten under praktisk forekomment de forhold kan f.eks. sættes til maksimalt 2 deg/cm, hvorfor diffusionstallet højst kan forventes at ligge ca. 10% over det under isoterme forhold bestemte; virkningen kan altså negligeres. Forekommer derimod kondens i materialet, hvorved fugtindholdet stiger væsentligt, skønnes virkningskoefficienten til ca. 335%/deg/cm. De transporterede fugtmængder vil altså være 7-8 gange større, end når materialet kun indeholder hygroskopisk fugt!

Efter de i afsnit 3.1.2 nævnte måleresultater fra SBI på limet gasbeton skønnes - til sammenligning med de ovennævnte resultater - en virkningskoefficient på ca. 22%/deg/cm.

Temperaturniveauets indflydelse skønnes til ca. -1,9%/°C (fig. 68B), altså nogenlunde samme størrelsesorden som bestemt for blød træfiberplade. Bortset fra kølehusforhold vil større forskelle i temperaturniveauet end f.eks. 10°C vel sjældent forekomme i praksis, hvorfor korrektion normalt formentlig kan undlades under hensyn til den usikkerhed, diffusionstallet er behæftet med.

Betydningen af, at den relative fugtighed er højere på den kolde side end på den varme, svarer til en virkningskoefficient på ca. -1,8%/° RF/cm, hvorfor evt. korrektion altid kan udelades ved praktisk forekommende materialetykelser. Ved laboratoriemæssig bestemmelse af diffusionstallet for tynde prøver, bør man derimod være opmærksom på korrektion for forskelle i den relative fugtighed.

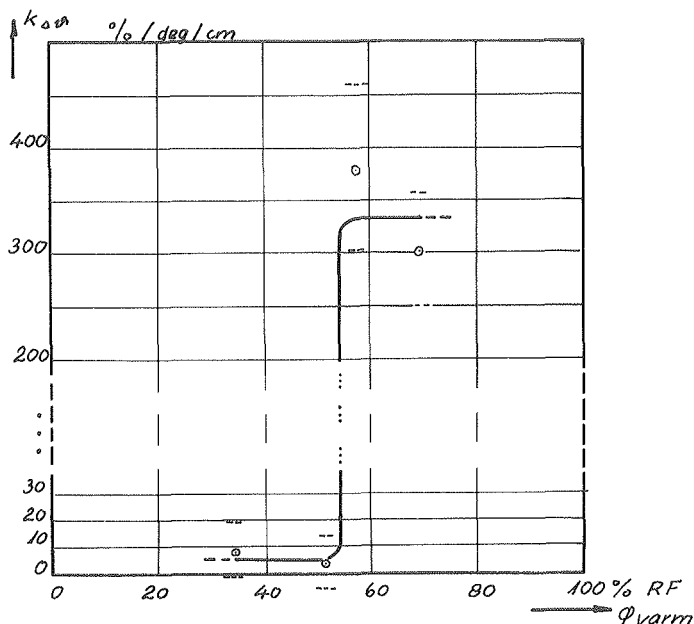


Fig. 68A

Fig. 68. Virkningskoefficienter for A: temperaturgradient, B: temperaturniveau og C: rel. fugtighedsgradient (gasbeton).

Influence sur la perméabilité à la vapeur A: d'un gradient de température, B: du niveau de la température et C: d'un gradient de l'humidité relative. (Béton cellulaire).

The influence on the vapour permeability of A: the temperature gradient, B: the temperature level and C: the relative humidity-gradient. (Cellular concrete).

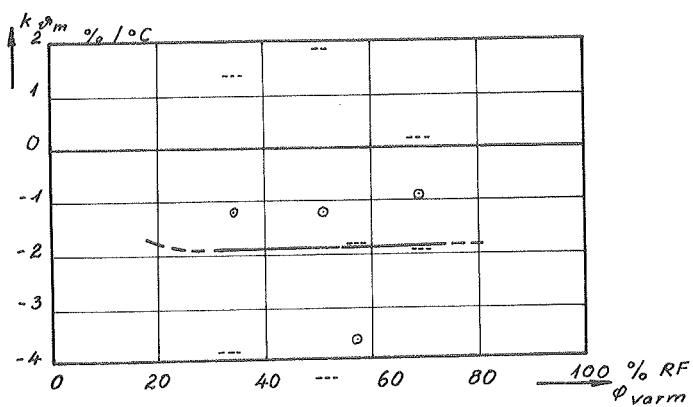


Fig. 68B

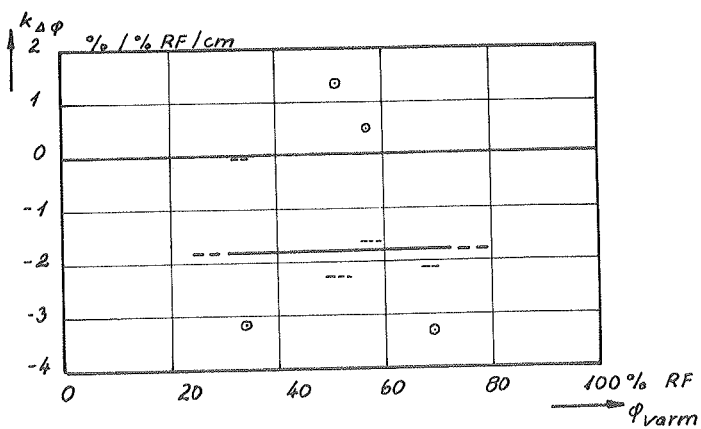


Fig. 68C

Overfladekondensation

Som tidligere omtalt blev det empirisk bestemt, at den fra NaCl-opløsningen afgivne fugtmængde måtte ligge i nærheden af den maximale, der under de givne forhold kunne absorberes af prøvelegemet og atter afgives på den kolde side.

Det kan derfor, som i afsnit 5.5.1.2, være af interesse at undersøge, hvilken betydning formlen: $g = \frac{\partial p_s}{\partial \theta} \frac{\Delta \theta}{e} d$ (13) kan tillægges i dette tilfælde.

På grundlag af målingerne af temperaturer og absorberet fugtmængde i de 8 forsøg beregnes middelværdien af det tilsyneladende diffusionstal til $d_m = 115 \times 10^{-3}$ g/mhmmHg med en standardafvigelse på $s = 25 \times 10^{-3}$. Der er således intet til hinder for, at formlen (13) også i dette tilfælde vil kunne anvendes ved overslag over, hvor stor en fugtmængde, der ved overfladekondens trænger ind i materialet. Den værdi, der bør indsættes for det tilsyneladende diffusionstal er dog så stor (størrelsesorden som luftens diffusionstal, D), at det er tvivlsomt, om formlen giver udtryk for de faktiske forhold.

Beregning af fugtledningstallet

En variation i den relative fugtighed på den kolde side fra 67,5 til 90% RF har medført ca. 8% lavere tilsyneladende diffusionstal (smlg. fig. 67C).

Af sorptionskurven (fig. 66) fås:

$$u_{90} - u_{67,5} = 5,7 - 3,3 \text{ (vægt\%)} = 24 \text{ g/kg}$$

Heraf beregnes, som under 5.5.1.2 nærmere beskrevet, følgende fugtledningstal:

$$\varphi_1 : k \sim 0,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$$

$$\varphi_2 : k \sim 0,9 \times 10^{-6} \quad -$$

$$\varphi_3 : k \sim 8 \times 10^{-6} \quad -$$

$$\varphi_4 : k \sim 15 \times 10^{-6} \quad -$$

Værdierne synes at stemme overens med de af KRISCHER angivne (jvf. fig. 25B).

På grundlag af udtørningsforsøg ved 20°C, 65% RF har forfatteren bestemt k-værdien til ca. $3,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$ [28].

5.6. Konklusioner af forsøgsresultaterne

De refererede forsøg over fugttransporten er udført på et par typisk hygroskopiske materialer. Det kan for disse konstateres, at damptrykgradienten har langt den væsentligste indflydelse på den samlede fugttransport, og denne vil altså normalt kunne beskrives ved hjælp af grundligningen

$$g = -d \partial p / \partial x \quad (8)$$

De øvrige undersøgte faktorer: temperaturgradient og temperaturniveau i materialet samt forskelle i den relative fugtighed på de to sider vil normalt, når materialets fugtindhold ikke overskrider det "hygroskopiske", have en så beskednen indflydelse, at dennes størrelsesorden ikke overskrider den nøjagtighed, hvormed diffusionstallet er kendt.

For diffusionstallet, d , kan altså - så længe kondens i materialet ikke forekommer - i (8) indsættes en gennemsnitsværdi, bestemt ved den traditionelle, isoterme metode.

Også i de tilfælde, hvor kondens forekom inde i materialet eller i form af overfladekondens, indstillede en ligevægt sig i den transporterede fugtmængde pr. tidsenhed. I disse tilfælde, hvor den samlede fugttransport formentlig er et kompliceret samspil af dampdiffusion og kapillar væske-transport, kan fugttransporten altså også - rent formelt - beregnes af (8).

Det "tilsyneladende diffusionstal", der bør benyttes, er imidlertid væsentligt større end det egentlige diffusionsstal; den samlede fugttransport er endvidere stærkt afhængig af temperaturgradienten. Ved de valgte temperaturforhold konstateredes for træfiberpladen tilsyneladende diffusionsstal af størrelsesorden $(0,5 - 1) \cdot D$, hvor D angiver diffu-

sionstallet af et stillestående luftlag, mens de tilsvarende værdier for gasbeton lå på $(1,5 - 2) \cdot D$.^{*)}

Indflydelsen på den samlede fugttransport af temperaturniveau og forskelle i relativ luftfugtighed samt af temperaturgradienten ved lavere fugtindhold er - som nævnt - af samme størrelsesorden som forsøgsusikkerheden på bestemmelsen af diffusionstallet. Det har derfor kun været muligt at angive den sandsynlige virkning af disse faktorer.

Det er bemærkelsesværdigt, at temperaturniveauet hovedsageligt synes at have indflydelse på den "udjævnende kapillarsugning" - altså væsketransporten modsat rettet varmemestrømmen, samt at denne indflydelse synes konstant uanset fugtniveauet. Dette tyder altså på, at fugttransporten i væskeform er modsat rettet varmemestrømmen også ved høje fugtindhold, mens den overvejende fugttransport - i varmemestrømmens retning - er i dampform.

At de tilsyneladende diffusionstal ved højt fugtniveau konstateres at være større end diffusionstallet for et stillestående luftlag er ikke i modstrid med antagelsen om, at fugttransporten i varmemestrømmens retning i hovedsagen er en damptransport, såfremt PHILIP og de VRIES's hypotese accepteres (omtalt i afsnit 2.3.5). Ifølge denne afhænger den termiske fugttransport jo af diffusionen i de dampfyldte porer, idet en kapillarbevægelse i de forbindende væskefyldte kar indstiller sig i takt hermed; diffusionen vil såle-

*) Da variationen her således er ganske betydelig, må det specielt i disse tilfælde siges at være en svaghed ved forsøgsresultaterne, at de til fugttransporttallene svarende fugtindhold ikke blev målt. Imidlertid ville dette have medført sådanne komplikationer i forsøgsopstillingen, at vi med de tidligere fremførte motiveringer har afholdt os herfra.

des hovedsageligt "styres" af temperaturgradienten over poren, da poreluften kan regnes mættet. Denne temperaturgradient afhænger selvfølgelig dels af den gennemsnitlige temperaturgradient over materialet - virkningen var i forsøgene "stærkt signifikant" -, men også af porestrukturen, hvorfor temperaturgradienter, der er væsentligt større end den gennemsnitlige, kan forekomme.

Det ovenstående kan kort sammenfattes i følgende:

Den termiske fugttransport kan altid betragtes som en diffusion af vanddamp.

Ved hygroskopiske fugtindhold er poreluften umættet, hvorfor den partielle damptrykgradient over materialet hovedsageligt bestemmer fugttransporten, og diffusionstal bestemt ved isoterme målinger vil være gældende.

Ved høje fugtindhold kan poreluften til dels antages mættet, og det vil formentlig i høj grad være temperaturgradienten samt selvfølgelig porestrukturen, der bestemmer fugttransporten. Også i dette tilfælde vil formlen (8) imidlertid give mulighed for overslagsberegninger. Dog bør de tilsyneladende diffusionstal i dette tilfælde sættes væsentligt højere, nemlig af størrelsesorden som stillestående luftlags.

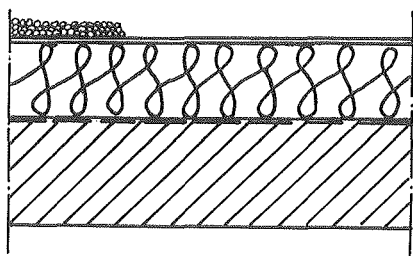
Overskrider materialets fugtindhold en vis grænse (beliggende i det hygroskopiske område), vil den termiske fugttransport overlejres af en "udjævnende" kapillarbevægelse i de sammenhængende væskefyldte kar (fra højere mod lavere rel. fugtighed). Men denne har ved de undersøgte forhold været af så ringe størrelse, at den kan negligeres ved en praktisk behandling af fugt gennemgangen.

6. APPENDIX (Eksempel 3)

Fugt i massive tagkonstruktionerIndledning

Flade, massive tagkonstruktioner er særdeles udsat for skadelige fugtpåvirkninger. Da man i dag besidder et beregningsgrundlag for fugttransmissionen i dampform, skulle en del af de problemer, man hidtil har truffet på, kunne finde deres løsning.

Vi betragter en konstruktion opbygget som vist på fig. 69.



1

2

3

4

Fig. 69

Massiv tagkonstruktion.

Toiture plate.

Flat roof.

1 er tagdækningen bestående af asfalt eller to á tre lag tagpås; 2 er et varmeisolerende lag, 3 en dampspærre, der undertiden kan være udeladt, og 4 det bærende betondæk.

Endelig vil tagdækningen oftest være forsynet med et beskyttende lag perlesten el. lign., og oven på eller under isoleringslaget vil findes et afretningslag af mager beton.

Vinterforhold

Det kan vises, at skal al kondensation i det isolerende lag undgås, må oversiden af betondækket være forsynet med en dampspærre, der er væsentlig tættere end tagdækningen.

Ved flade tage med ingen eller kun ringe hældning ($\leq 5\%$) sættes så ekstreme krav til tagdækningen m.h.t. regntæthed, at

også dampgennemtrængeligheden vil være meget ringe; kravet om tættere dampspærre vil højst kunne opfyldes v.hj. af en særdeles effektiv og veludført membran.

Imidlertid vil en vis kondensation i isoleringslaget kunne tillades, såfremt det kan vises, at denne ikke er af en sådan størrelse, at den - akkumuleret over længere tid - frembyder fare p.gr. af nedsættelse af isoleringsevnen eller evnt. nedbrydning af de indgående materialer.

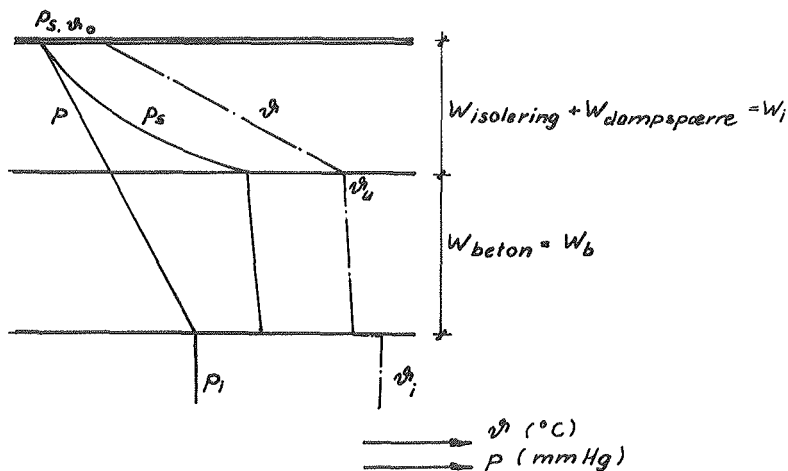


Fig. 70. Damptrykforløb under vinterforhold, tørre materialer.

Pressions de vapeur, saison froide; matériaux secs.

Vapour pressure pattern, cold season; dry materials.

En diffusionsberegning sætter én i stand til at vurdere kondensationsfaren. Ved optegning af damptrykdigrammet vil man, på den sikre side, regne tagdækningen for damptæt, og kurven for de partielle damptryk får et udseende som vist på fig. 70, hvor damptrykkene er optegnet i afhængighed af de indgående diffusionsmodstande.

I fig. 70 er dampspærre + isolering optegnet som et lag. En væsentlig del af trykfaldet vil selvfølgelig forekomme over en evt. dampspærre, mens temperaturfaldet i praksis vil ligge over isoleringen.

Den reelle damptrykkurve, p , fås under alle omstændigheder som tangenten fra p_i til kurven for de mættede damptryk, p_s .

Den dampmængde, der diffunderer ind i konstruktionen og kondenserer under tagappen, er:

$$G_i = (p_i - p_{s, \vartheta_0}) / \sum W \quad \text{f.eks. i g/m}^2\text{h}$$

hvor p_i er det partielle damptryk i lokalet nedenfor.

p_{s, ϑ_0} mætningstrykket svarende til temperaturen ϑ_0 lige under tagappen

og $\sum W$ de samlede indgående diffusionsmodstande.

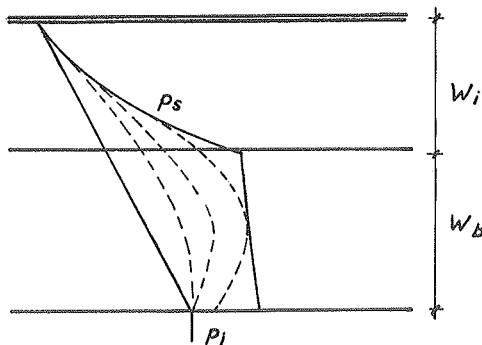


Fig. 71. Damptrykforløb under vinterforhold; fugtig beton.
Pressions de vapeur, saison froide; béton humide.
Vapour pressure pattern, cold season; humid concrete.

Det i fig. 70 skitserede damptrykforløb gælder for tørre materialer. Som bekendt er udtørringstiden for beton imidlertid særdeles langvarig, hvorfor det kan formodes, at fugt-

indholdet af betonen i nyere tagkonstruktioner overstiger det hygroskopiske, og damptrykkene må altså i så tilfælde regnes lig de mættede damptryk.

Fig. 71 viser det formodede damptrykforløb til forskellige tider efter fuldførelsen af byggeriet.

Det ses, at betonen vil tørre ud dels mod indersiden dels mod isoleringen, hvor fugten vil kondensere under tagdækningen. Så længe damptrykket på betonens overside er lig mætningstrykket, fås den i isoleringen indtrængende dampstrøm af udtrykket:

$$g_i = \frac{d}{\lambda} \times Q \times \left(\frac{\partial p_s}{\partial \vartheta} \right) \vartheta_u,$$

hvor ϑ_u er temperaturen i undersiden af isoleringslaget.

Da den i betonen indeholdte fugt repræsenterer meget store mængder - 10 á 15 vol% efter selve afbindingstiden er ikke ualmindeligt, er det væsentligt, at der ved en vurdering af fugtrisikoen i isoleringslaget tages hensyn til byggefugten.

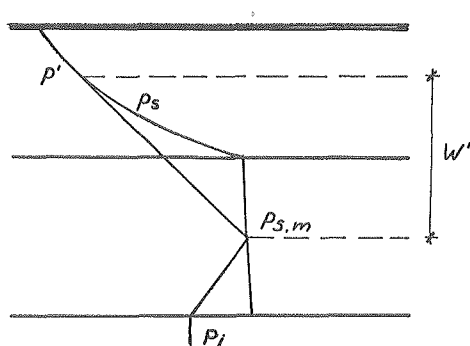


Fig. 72. Hypotetisk damptrykforløb; fugtig beton.

Allure hypothétique des pressions de vapeur;
béton humide.

Hypothetical vapour pressure pattern; humid
concrete.

En mulig beregningshypotese vil være den på fig. 72 skitse-rede, hvor damptrykkene antages mættede i midterplanet af betondækket. Den gennemsnitlige udtørring af betonen er således bestemt af hældningen af linien $p_{s,m} - p_i$:

$$g_s = (p_{s,m} - p_i) / \frac{W_b}{2} ,$$

mens den i isoleringen indtrængende dampstrøm angives af $p_s - p'$'s hældning:

$$g_i = (p_{s,m} - p') / W' .$$

Det ses umiddelbart, at beregningshypotesen vil føre til større fugtakkumulering i isoleringen.

Sommerforhold

Under sommerforhold vil tagdækningen ofte opnå en - endog meget betydelig - overtemperatur, og damptrykforløbet bliver som vist i fig. 73.

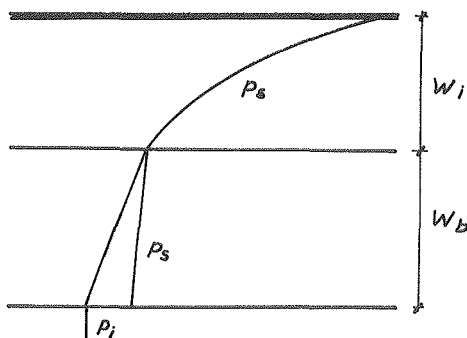


Fig. 73. Damptrykforløb under sommerforhold.

Pressions de vapeur, saison chaude.

Vapour pressure pattern; warm season.

Forefindes fugt i isoleringslaget, i et afretningslag herover el.lign., vil kondensation normalt forekomme på betonoverfladen eller på en eventuel dampspærre anbragt herover.

Den kondenserede mængde er givet ved:

$$g = \left(\frac{d}{\lambda}\right)_{\text{isolering}} \times Q \times (\partial p_s / \partial \vartheta)_{\vartheta_u},$$

hvor ϑ_u er temperaturen på undersiden af isoleringslaget.

Den kondenserede fugtmængde kan stamme fra fugt aflejret i isoleringen i løbet af vinteren; men også i dette tilfælde repræsenterer byggefugt en risiko for fugtnedslag i isoleringen:

Ganske betydelige fugtmængder kan være indelukket i et afretningslag el.lign. over isoleringen; under indflydelse af solen vil denne fugt da tvinges ned i isoleringen.

Den fugtmængde, der afgives af konstruktionen ved diffusion, er givet ved damptrykdifferensen $p_{s,\vartheta_u} - p_i$ divideret med diffusionsmodstanden af samtlige lag under isoleringen (evt. dampspærre + beton). Det ses, at er en effektiv dampspærre anbragt over betondækket, bliver fugten i isoleringen, og afhængig af varmestrømmens retning vil den enten bevæge sig opad (vinterforhold) eller nedad (sommerforhold).

Også uden dampspærre er udtørningsmulighederne ved diffusion imidlertid stærkt begrænset, idet damptrykdifferensen $(p_{s,\vartheta_u} - p_i)$ er relativt beskeden, og 10-15 cm beton repræsenterer en temmelig stor diffusionsmodstand. (Med en damptrykforskel af størrelsesorden 10 mmHg og en diffusionsmodstand på ca. 50 $\text{m}^2 \text{hmmHg/g}$ fås en udtørring af størrelsesorden: $10/50 = 0,2 \text{ g/m}^2 \text{h}$).

I dette tilfælde vil man dog formentlig kunne drage nytte af betonens kapillarsugende egenskaber, således at mulighederne for fjernelse af den på betonoverfladen kondenserede fugt er væsentlig bedre end udtrykt ved en diffusionsberegning.

Efter foreløbige, simple forsøg udført af forfatteren er en grænse for absorptionsevnen af en nøgen betonoverflade bestemt til ca. $100 \text{ g/m}^2\text{h}$. Skønt kapillarsugningen ikke beherskes beregningsmæssigt, finder vi dog, at den er så væsentlig for en udtørring af isoleringslaget, at den bør tages i betragtning.

Vi foreslår derfor (omend det understreges, at et fuldstændigt erfaringsgrundlag endnu mangler), at man ved bedømmelse af isoleringslagets udtørningsmulighed beregner den fra isoleringen maksimalt uddiffunderede fugtmængde af formelen:

$$g = (d/\lambda)_{\text{isolering}} \times Q \times (\partial p_s / \partial \vartheta)_{\vartheta_u}.$$

Denne mængde kan forudsættes at blive absorberet af betonen i kvanta op til $100 \text{ g/m}^2\text{h}$, såfremt fugten i væskeform kommer direkte i forbindelse med betonoverfladen.

Findes "spærrelag" indskudt, der hindrer fugttransporten i væskeform, må der foretages en egentlig diffusionsberegning.

Beregningseksempel

Nedenstående beregninger er foretaget for en simpel tagkonstruktion opbygget af 15 cm bærende jernbeton + 7 cm isoleringslag + tagdækning. k-værdien for en sådan tagkonstruktion vil ligge på ca. $0,45 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$.

Vinterforhold

Fugtaakkumulationen i løbet af en vinter er beregnet v.h.j. af den i afsn. 4.3.1 beskrevne integrationsmetode.

Fig. 74 viser resultatet af beregningerne over fugtaakkumulationen i løbet af en vinter, afsat som funktion af diffusionsmodstanden W_1 af isoleringsmateriale + evt. dampspærre. Kurve 1 er beregnet under hensyntagen til byggefugten i betonen, kurve 2 og 3 er beregnet under forudsætning af tør beton, d.v.s. kondensationen skyldes i disse tilfælde luft-

fugtigheden i lokalerne under tagkonstruktionen. Indendørs-temperaturen er sat til 25°C, mens den relative luftfugtighed i tilfældene 2 og 3 er henholdsvis 80 og 40% R.H., altså særdeles fugtige, henholdsvis relativt tørre omgivelser.

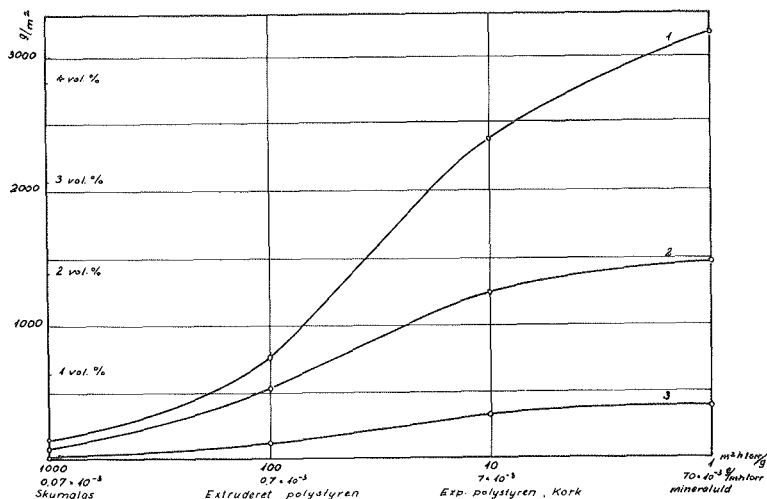


Fig. 74. Fugttakkumulering i isoleringslaget i løbet af en vinter.

Accumulation d'humidité dans la couche d'isolation pendant un hiver.

Moisture accumulation in the insulation layer during a winter.

Det ses, at byggefugten repræsenterer en væsentlig større risiko for kraftig kondens i isoleringslaget end selv meget fugtige lokaler.

Ordinatakssens højre skala angiver isoleringsmaterialets mid-delfugtighed og tjener kun til at angive fugtmængdernes stør-relsesorden, da der normalt ikke vil være tale om homogen fugtfordeling.

Det vil afhænge af isoleringsmaterialets art, hvor fugttakku-muleringen finder sted. I et tæt materiale som f.eks. poly-

styren vil fugten samles, hvor den kondenserer, nemlig lige under tagdækningen, mens fugten ved f.eks. mineraluld formentlig vil samle sig i isoleringens underside.

Særlig interesse knytter sig til abscisseaksens nederste skala. Her er angivet det til diffusionsmodstanden W_i svarende diffusionstal af 7 cm isoleringsmateriale, såfremt dette er anbragt uden dampspærre, direkte på beton eller afretningslag.

Kurve 3 viser da, at i de sjældne tilfælde, hvor betonen kun indeholder uvæsentlige fugtmængder, kan ethvert forekommende isoleringsmateriale anbringes uden dampspærre over tørre rum, såfremt isoleringen kan tørre ud den følgende sommer. Over fugtige rum kan normalt kun de mest damp-tætte materialer anbringes uden dampspærre. Hvor grænsen skal drages, vil afhænge af den med fugtakkumulationen forøgede k-værdi samt af risikoen for nedbrydning af materialet under fugtpåvirkning. Endelig er udtørningsmulighederne af isoleringsmaterialet afgørende, idet fugten ikke må ophobe sig fra år til år.

Da betons udtørningstid som bekendt er meget langvarig (jvf. [28]), bør kurve 1 normalt være dimensionsgivende.

Sommerforhold

Som nævnt i det foregående skulle der være mulighed for, at isoleringsmaterialet kan tørre ud, såfremt betonens kapillarsugende egenskaber tages i betragtning.

Imidlertid foreligger der os bekendt ikke målinger over længere tid af de gennemsnitligt opnåede tagtemperaturer, således at en til fig. 38 svarende sumkurve ikke eksisterer.

Ved Laboratoriet for Varmeisolering er gennem en enkelt sæson målt de opnåede temperaturer af tagpappet i en flad tagkonstruktion, dels ved ubeskyttet tagpap, dels med ca. 2 cm ærtesten udlagt som beskyttelse. Fig. 75 viser eksempelvis temperaturforløbet på en almindelig solskinsdag. Det

ses, at det ubeskyttede tagpap undergår væsentlig større temperaturforandringer end det beskyttede: Den sorte flade opvarmes kraftigere under solens påvirkning og afkøles stærkere under den natlige udstråling.

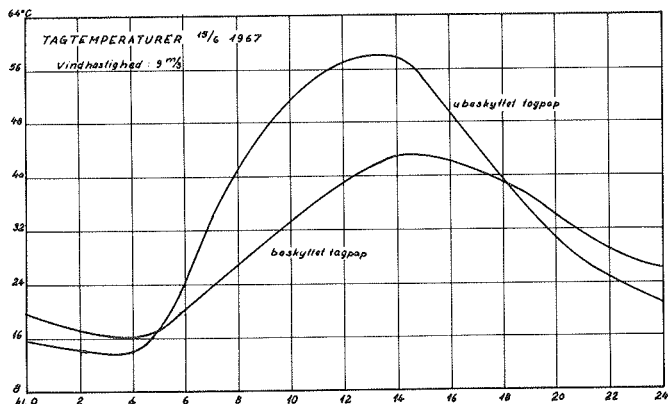


Fig. 75. Tagdækningens temperaturforløb på en almindelig dansk solskinsdag.

Températures du revêtement d'étanchéité mesurées un jour d'été soleille (au Danemark). (Sans et avec protection).

Temperatures of the roofing felt measured a sunny summerday in Denmark. (With and without protection.)

En sumkurve over de opnåede temperaturer større end ca. 30°C er vist på fig. 76. Kurverne kan tilnærmelsesvis angives ved to rette linier med hældningerne:

$$65 > \vartheta > 48^{\circ}\text{C} : \alpha_1 \sim 16 \text{ h}/^{\circ}\text{C}$$

$$48 > \vartheta > 30 - : \alpha_2 \sim 38 -$$

for ubeskyttet tagpap, samt

$$56 > \vartheta > 40^{\circ}\text{C} : \alpha_1 \sim 19 \text{ h}/^{\circ}\text{C}$$

$$40 > \vartheta > 30 - : \alpha_2 \sim 60 -$$

for beskyttet tagpap.

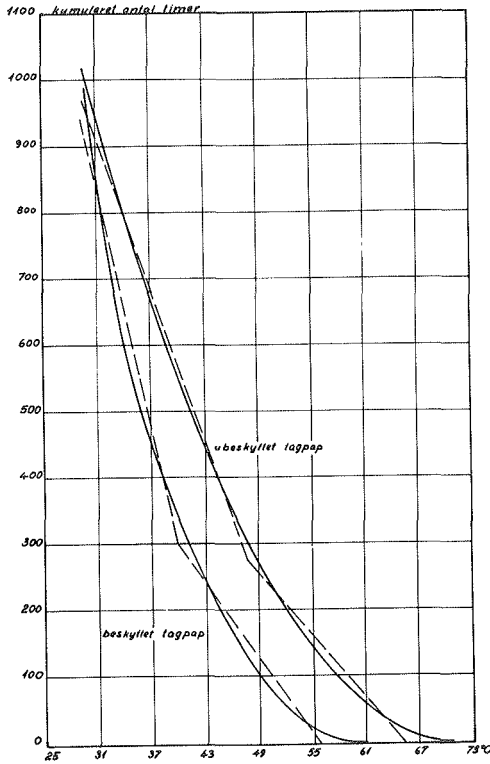


Fig. 76. Sumkurve over tagdækningens temperaturer.

Températures du revêtement d'étanchéité cumuléées.

Temperatures of the roofing felt summed up.

Da den nedadrettede fugtstrøm beregnet efter formelen:

$$g = (d/\lambda)_{\text{isol.}} \times Q \times (\partial p_s / \partial \vartheta)_{\vartheta_u}$$

aldrig overstiger ca. 50 g/m²h ved de temperaturer, der opnås, har vi ved hjælp af en grafisk integrationsmetode analog til den ovenfor omtalte beregnet, hvor stor en fugtmæng-

de der kan formodes at blive opsuget af betonen (og hermed fjernet), når betonen ikke er forsynet med dampspærre.

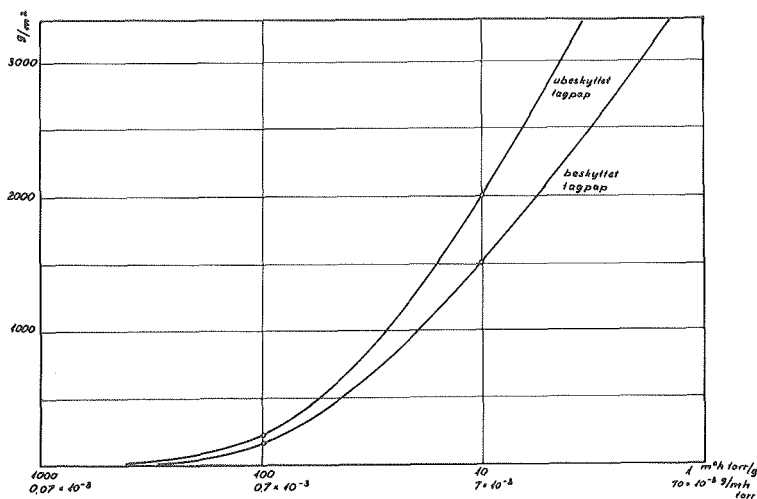


Fig. 77. Udtørningsmulighed for isoleringslaget i løbet af en sommer.

Les possibilités de séchage de la couche d'isolation pendant un été.

The drying-out possibilities of the insulation layer during a summer.

Resultatet fremgår af fig. 77. Sammenlignes denne med fig. 74, fremgår det, at relativt dampgennemtrængelige materialer kan forventes at tørre ud i løbet af den varme årstid, såfremt de er anbragt på betonen uden dampspærre. For ret damptætte materialer vil den formodede udtørring være mindre end fugtakkumulationen i løbet af en vinter.

Konklusion

Ved overvejelser vedr. fugtfaren i isoleringslaget i en massiv tagkonstruktion bør der normalt tages hensyn til bygge-fugten i betondækket. Beregningerne over den i løbet af en vinter akkumulerede fugtmængde viser, at kun helt damptætte materialer i dette tilfælde vil kunne benyttes uden dampbremsende membran.

Kan betonen forudsættes at have været underkastet forudgående udtørring (men herved skal forstås adskillige måneders lagring), vil den fugtakkumulering, der foregår i isoleringsmaterialet anbragt uden dampspærre, i løbet af en vinter normalt kunne tolereres over lokaler uden alt for stor fugtproduktion.

Vore foreløbige undersøgelser viser, at den akkumulerede fugtmængde vil blive drevet ud af isoleringen og opsuges af betonen i løbet af den følgende sommer. Dette forudsætter dog direkte kontakt mellem den kondenserende fugt og betonen. Isoleringsmaterialet må altså højst være pletvis klæbet til betonoverfladen. Såfremt betonoverfladen er forsynet med nogen form for vandstandsende lag, som f.eks. bare en "Primer", må denne udtørningsmulighed udelukkes.

Frygtes fugtindtrængen i isoleringslaget ad den ene eller den anden vej, må andre udtørningsmuligheder oftest forudses, og her kommer formentlig kun en egentlig ventilering af isoleringslaget på tale.

Da byggefugt i betonen normalt betyder en væsentlig risiko for kondens i isoleringsmaterialet, bør dette oftest anbringes over en effektiv dampspærre. Eventuel fugt i isoleringsmaterialet har da imidlertid ingen mulighed for at undslippe, hvorfor det understreges, at isoleringsmaterialet altid skal anbringes i absolut tør tilstand.

En let ventilering af isoleringslaget kan udgøre en ekstra sikkerhed, men bør ikke føre til mindre krav til dampspærens effektivitet eller om tørre isoleringsmaterialer.

RESUMÉ

Hovedvægten i det foreliggende arbejde omhandlende fugt og fugttransport i byggematerialer er lagt på en ret indgående omtale af beregningsmetoderne for fugttransporten (hovedsageligt i dampform) samt i et forsøgsteknisk afsnit, der omhandler de af forfatteren udførte forsøg vedrørende den termisk betingede fugttransport, d.v.s. fugttransport ved samtidig varmetransport, i hygroskopiske materialer.

I de indledende afsnit omtales de vigtigste grundbegreber såsom luftfugtighed, karakterisering af porøse materials fugtindhold ved angivelse af sorptionskurverne eller fugtbindingsenergien samt de forskellige former for fugttransport, herunder specielt diffusion af vanddamp og kapillartransport af vand i væskeform. Da nettofugttransporten i byggematerialer oftest vil skyldes et kompliceret samspil af de sidstnævnte og derfor må bestemmes ad empirisk vej, omtales endelig forskellige metoder til måling af fugttransportegenskaberne.

I afsnittet vedrørende beregningsmetoder behandles fugttransporten ved såvel stationære som ikke-stationære forhold.

For stationære forhold benyttes det forenkledede udtryk for diffusionsloven: $g = -d \partial p / \partial x$ (8), hvor d er diffusionstallet, udtrykt i $g/mhmmHg$ og $\partial p / \partial x$ den partielle damptrykgradient. Der vises dels den af bl.a. GLASER tidligere udført behandlet grafiske metode, dels udledes på grundlag af (8) en sammenhæng mellem diffusion og varmestrøm, der undertiden kan benyttes ved en analytisk behandling.

Efter en omtale af principperne, der bør ligge til grund for en fastsættelse af klimabetingelserne ved fugtberegninger, vises endelig et par eksempler på praktiske diffusionsberegninger.

Fugttransport i ikke-stationære tilfælde behandles på grundlag af udtrykket $\partial p / \partial t = \frac{d}{\xi_0 \rho_0} p_s \partial^2 p / \partial x^2$ (11), hvor fugtko-

paciteten $\xi = \xi_0/p_s$ udtrykkes i g pr. kg tørt materiale pr. mmHg. ξ_0 angiver sorptionskurvens hældning. Afsnittet illustreres med eksempler på anvendelsen af (11).

Som videre illustration til afsnittet omtales sluttelig byggematerialernes funktion som "fugt-stødpuder".

Til målinger over fugtgennemgangen i byggematerialer er ved Laboratoriet for Varmeisolering fremstillet et apparatur bestående af en "kold" og en "varm kasse", hvorimellem fire prøvelegemer af dimension $0,48 \times 0,48 \text{ m}^2$ kan anbringes. Forsøgsapparatet kan bl.a. tjene til bestemmelse af diffusionstallene under en samtidig varmetransmission, hvilket er i bedre overensstemmelse med praktiske forhold end den gængse, isoterme metode til bestemmelse af diffusionstallet.

Der er foretaget målinger for henholdsvis blød træfiberplade i 1,3 cm's tykkelse og gasbeton i 5 cm's tykkelse. Temperaturen på den kolde side blev varieret i intervallet $-10 - 0^\circ\text{C}$ og på den varme side i intervallet $25 - 35^\circ\text{C}$. På den kolde side var den relative fugtighed 65 eller 90% RF. Der blev endvidere målt ved fire forskellige relative luftfugtigheder på den varme side; de to højeste af disse medførte henholdsvis overfladekondensation og kondens i materialet, men under alle forhold indstillede der sig - efter en vis tid - stationær tilstand i de pr. tidsenhed transporterede fugtmængder, hvorfor et "tilsyneladende diffusionsstal" under alle omstændigheder kunne beregnes.

Det konstateredes, at ved lave (hygroscopiske) fugtindhold af materialet angiver de ved isoterme metoder bestemte diffusionstal i forbindelse med (8) med god tilnærmelse fugttransporten også ved en samtidig varmem strøm; ved høje fugtindhold - altså når der forekom kondens - var de transporterede fugtmængder imidlertid væsentlig større, og i forbindelse med (8) bør anvendes tilsyneladende diffusionstal af mindst samme størrelsesorden som diffusionstallet for stillestående luftlag.

Ved hjælp af en statistisk forsøgsplanlægning har det været muligt at angive indflydelsen på det tilsyneladende diffusionstal af temperaturgradient og -niveau i materialet samt af en forskel i den relative luftfugtighed på kold og varm side. De nævnte faktorerers virkning er kun af samme størrelsesorden som den normale ubestemthed på diffusionstallet; for temperaturgradientens virkning gælder dette dog kun for lave fugtindhold af materialet. Forekommer kondens i materialet, synes temperaturgradienten således at have en væsentlig indflydelse på den samlede fugttransport.

De fundne virkninger synes at bekræfte en hypotese om, at den termisk bestemte fugttransport, altså fugttransporten i varmestrømmens retning, hovedsagelig skyldes dampdiffusion, uanset materialets fugtindhold, samt at denne i hygroskopiske materialer overlejres af en kapillar væskebevægelse fra højere mod lavere relativ fugtighed.

I et appendix er - som et videregående eksempel på fugttransportberegningerne - behandlet en række forhold i forbindelse med flade, massive tage.

RÉSUMÉ

L'étude présente sur le transfert d'humidité dans les matériaux de construction attache la plus grande importance à une description des méthodes à calculer le transfert (principalement sous forme de vapeur) ainsi qu'à une partie expérimentale traitant les essais entrepris par l'auteur pour éclairer le transfert thermique, c'est-à-dire le transfert d'humidité à un transfert de chaleur simultanée.

Dans les chapitres préliminaires est fait mention de quelques notions de base telles que l'humidité de l'air, caractéristiques de la teneur d'humidité par les courbes de sorption ou les courbes de succion ainsi que les différentes formes de transfert, et dans cette catégorie surtout la diffusion de vapeur d'eau et le transfert capillaire sous forme liquide. Puisque le transfert net normalement est très complexe et donc doit être déterminé empiriquement, sont finalement discuté différentes méthodes à mesurer la propriété de transfert.

Le chapitre concernant les méthodes de calcul traite non seulement des conditions stationnaires mais aussi des cas non-stationnaires.

Pour les conditions stationnaires est utilisé l'expression simplifiée de la loi de diffusion: $g = -d \partial p / \partial x$ (8), où d est la perméabilité à la vapeur (en $g/mhmHg$) et $\partial p / \partial x$ le gradient des pressions partielles. D'une part est montré la méthode graphique qui déjà a été étudié en détail par GLASER et d'autre part est à la base de (8) dérivé le rapport entre diffusion et transfert de chaleur qui parfois peut être utile.

Après une discussion sur les principes de la stipulation de conditions climatiques pour les calculs de condensation etc. sont finalement montré deux exemples de calculs.

Transfert d'humidité en régime non-stationnaire est étudié à la base de l'expression: $\partial p / \partial t = \frac{d}{\xi_o \rho_o} p_s \partial^2 p / \partial x^2$ (11) où

la capacité $\xi = \xi_0/p_s$ est exprimée en g par kg de matériau sec et par mmHg. ξ_0 est la pente de la courbe de sorption. Le chapitre est illustré d'exemples de l'application de (11). Comme une autre illustration de ce chapitre est finalement discuté l'inertie de matériaux de construction en ce qui concerne absorption et désorption d'humidité.

Pour les essais portant sur le transfert d'humidité a été construit au Laboratoire d'Isolation Thermique de l'Université Technique de Danemark un équipement destiné à mesurer la perméabilité à la vapeur de quatre échantillons aux dimensions $0,48 \times 0,48 \text{ m}^2$. Le transfert a lieu simultanément qu'un transfert de chaleur ce qui est plus près des conditions réelles que la méthode courante pour la mesure de la perméabilité.

Des mesures ont été effectuées sur une plaque de fibre de bois d'épaisseur 1,3 cm et sur béton cellulaire d'épaisseur 5 cm. Les températures ont été -10 à 0°C au coté froid et 25 à 35°C au coté chaud. L'humidité relative du coté froid a été 65 ou 90% HR, et l'on a mesuré à quatre différentes humidités du coté chaud, les deux supérieures de celles-ci ayant entraîné condensation superficielle ou condensation dans le matériau, mais en tous cas s'établissait - après un certain temps - un régime stationnaire et il a par conséquent été possible de calculer une "perméabilité apparente".

On a constaté qu'il est possible - même à un transfert de chaleur simultané - pour des teneurs d'humidité faibles (hygroscopiques) de calculer le transfert d'humidité avec une bonne approximation à l'aide de (8) où la perméabilité est donnée par des mesures isothermes. À des taux d'humidité plus grands - c'est-à-dire lorsque de la condensation s'est produit - les quantités transmises ont été nettement plus élevées, et il faut employer des perméabilités apparentes de la même ordre de grandeur que celle de l'air.

Grâce à un procédé statistique il a été possible d'estimer l'influence sur la perméabilité apparente de gradient et

niveau de la température du matériau et de la différence de l'humidité relative des deux côtés. L'effet de ces facteurs n'excède pas l'inexactitude avec laquelle la perméabilité est connue normalement; en ce qui concerne l'effet du gradient de température ceci n'est toutefois valable que pour des teneurs d'humidité assez faibles. Lorsque condensation se produit dans le matériau le gradient de température paraît avoir une influence assez importante sur le transfert total.

Les effets trouvés paraient pouvoir confirmer l'hypothèse concernant le transfert thermique (PHILIP et de VRIES) disant que le transfert d'humidité dans la direction du transfert de chaleur est dû surtout à une diffusion de vapeur - n'importe quel soit le taux d'humidité du matériau -, et ce transfert est superposé d'un transfert capillaire sous forme liquide vers les humidités relatives moins élevées.

Comme un exemple plus poussé des calculs de transfert d'humidité est dans un appendice étudié quelques aspects en relation de l'isolation thermique de toitures plates.

SUMMARY

The present study concerning the moisture transfer in building materials is divided into two main sections, the first dealing with the methods of calculating (mainly the vapour phase), the second describing the author's experiments concerning the thermal moisture transfer, i.e. moisture transfer at a simultaneous heat transfer in hygroscopic materials.

In the introductory chapters are mentioned the basic principles such as humidity, the characterizing of moisture content in porous materials (sorption- and suction curves) and the different main forms of moisture transfer, among these especially vapour diffusion and capillary transfer of water in the liquid state. As the net moisture transfer often will be a complicated interaction of these and therefore must be evaluated empirically, are finally mentioned different methods of measuring the moisture transfer characteristics.

In the chapter concerning the calculating methods the moisture transfer is treated both in stationary and non-stationary conditions.

For stationary conditions is used the simplified expression of the diffusion law: $g = -d \partial p / \partial x$ (8), where d is the vapour permeability (in g/mhmmHg) and $\partial p / \partial x$ the partial vapour pressure gradient. The graphical method, especially developed by GLASER, is shown, and further is from (8) derived the connexion between diffusion and heat transfer which may be used for some analytical purposes.

After a discussion of the principles according to which the climatic conditions for moisture transfer calculations may be established, are finally shown two examples of practical diffusion calculations.

Moisture transfer in the non-stationary cases is treated on the basis of the expression $\partial p / \partial t = \frac{d}{\xi_o \rho_o} p_s \partial^2 p / \partial x^2$ (11),

where $\xi = \xi_o/p_s$ is the moisture capacity (in g per kg of dry material per mmHg). ξ_o indicates the gradient of the sorption curve. Applications of (11) are shown.

As a further illustration is finally mentioned the function of building materials as "moisture-buffers".

At the Thermal Insulation Laboratory of the Technical University of Denmark an apparatus consisting of a "warm" and a "cold box" has been constructed for the experiments concerning the moisture transfer in building materials; four specimens of dimensions $0,48 \times 0,48 \text{ m}^2$ can be placed between the boxes. With the test apparatus the vapour permeability can be determined at a simultaneous heat transfer which corresponds far better to the practical conditions than the common isothermal method of testing the vapour permeability.

Experiments have been carried out on respectively wood fibre board of thickness 1,3 cm and cellular concrete of thickness 5 cm. The temperature on the cold side varied from -10 to 0°C and from 25 to 35°C on the warm side. On the cold side the relative humidity was 65 or 90% RH. Further was measured at four different humidities on the warm side; the two higher of these humidities caused surface condensation or condensation in the material but even in these cases - after a certain time - a stationary state was established and an "apparent vapour permeability" could therefore under all circumstances be calculated.

It was stated that by low (hygroscopic) moisture contents of the material the formula (8) will with a good approximation indicate the moisture transfer - even at a simultaneous heat transfer - when a value of the permeability determined isothermally is used; by high moisture contents - i.e. when condensation occurred - the transferred moisture quantities were essentially greater, and if (8) is used a vapour permeability of at least the same magnitude as that of stagnant air, must be used.

By means of a statistical test planning it has been possible to specify the influence on the apparent vapour permeability of temperature gradient and temperature level in the material, and of a difference in the relative humidity on cold and warm side. The effect of these factors has only the same magnitude as the normal undefiniteness of the vapour permeability; as regards the effect of the temperature gradient this is, however, only true for low moisture contents of the material. When condensation is occurring, the temperature gradient seems to influence the total moisture transfer rather essentially.

The effects found seem to confirm a hypothesis for the thermal moisture transfer (PHILIP and de VRIES) saying that the moisture transfer in direction of the heat transfer is principally governed by a vapour diffusion in the pores of the material - even at high moisture contents -, and this is in hygroscopic materials superposed by a capillary liquid transfer from higher to lower relative humidities.

In an appendix - as a further example of the moisture transfer calculations - some problems in relation to the heat insulation of compact, flat roofs are discussed.

LITTERATURFORTEGNELSE

- [1] BARCS, W.: Design Values of Vapour Diffusion and Condensation in Building Structures. (Rilem/CIB Symposium. Helsinki 1965).
- [2] BECHER, P.: Varmer og Ventilation. Grundlaget. (Teknisk Forlag)
- [3] CAMMERER, I.S.: Der Wärme- und Kälteschutz in der Industrie. (Springer Verlag 1962).
- [4] CAEMMERER, W.: (Diskussionsindlæg ved Rilem/CIB Symposium. Helsinki 1965).
- [5] CAMMERER, W.F.: Die kapillare Flüssigkeitsbewegung in porösen Körpern. (VDI-Forschungsheft 500, 1963).
- [6] CHLUSOV, I.E.: Om beregning av fuktighet i flate takkonstruktioner. (Moskva 1958, ikke offentliggjort norsk oversættelse).
- [7] DUSINBERRE, G.M.: Heat Transfer Calculations by Finite Differences. (International Textbook Company, 1961).
- [7a] EDENHOLM, H.: Fuktighetsvandring och fuktighetsfördelning i byggnadsväggar. [Uddrag af "Några undersökningar rörande Norrlandsladugårdar". Meddelanden från Statens Forskningskommitté för Lantmannabyggnader. No.5, 1945.
- [8] EGESKJOLD, M.: Fugttransport i ydervægge. (Teknisk Forlag 1957).
- [9] EICHLER, F.: Neue Wärme- und feuchtigkeitstechnische Berechnungsverfahren zur Dimensionierung von Aussenbauteilen. (Deutsche Bau-Enzyklopädie. Berlin 1964).
- [10] FISCHER, G.: Tabellen zur Ermittlung der Tauwassermenge an Rohren und Wänden. (Kältetechnik 6/1958).
- [11] GEORGESCU, St., DUMITRIU-VÎLCEA, E., BOCANCEA, AL.: Izolarea termică a clădirilor (Bucarest 1961).

- [12] GLASER, H.: Wärmeleitung und Feuchtigkeitsdurchgang durch Kühlraumisolierungen. (Kältetechnik 3/1958, p. 86/91).
- [13] GLASER, H.: Temperatur- und Dampfdruckverlauf in einer homogenen Wand bei Feuchtigkeitsausscheidung. (Kältetechnik 6/1958, p. 174/181).
- [14] GLASER, H.: Vereinfachte Berechnung der Dampfdiffusion durch geschichtete Wände bei Ausscheiden von Wasser und Eis. (Kältetechnik 11/1958, p. 358/364 og 12/1958 p. 386/390).
- [15] GLASER, H.: Graphisches Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgängen. (Kältetechnik 10/1959, p. 345/349).
- [16] GLOBUS, A.M. & NERPIN, S.V.: Thermal transfer of moisture in closed systems of aggregates and granular ceramics. (Rilem/CIB Symposium. Helsinki 1965).
- [17] HANSON, R.: Fuktenskaper hos lättbetong och tegel. (Byggmästaren B 3, 1958).
- [18] HARSAAE, E.: Statistisk forsøgsmetodik. (Teknisk Forlag, 1966).
- [19] HECHLER, F.G., McLAUGHLIN, E.R., QUEER, E.R.: Simultaneous Heat and Vapor Transfer Characteristics of an Insulating Material. (Heating, Piping & Air Conditioning. Sept. 1942).
- [19A] HORIE, G.: On the Reduction of Humidity Variation in a Room by the Absorption of Wall Surfaces. (Rilem/CIB Symposium, Helsinki 1965).
- [20] HUTCHEON, N.B.: Combined heat and moisture flow philosophy and review of a canadian research program. (Research paper no. 119 of the D.B.R., National Research Council, Canada.).
- [21] JESPERSEN, H.B.: Rapport over forsøg vedrørende ligevægts- og diffusionsfugtindhold i vægmateriale. (Teknologisk Institut, København 1954).

- [22] JESPERSEN, H.B.: Fugtens indvirkning på plastskum og granuleret isoleringsmateriale. (Varme. Okt. 1961).
- [23] JOHANSSON, C.H.: Fuktighetens absorption och vandrings i byggnadsmaterial. (Teknisk tidsskrift, Okt.1944).
- [24] JOHANSSON, C.H.: Fuktgenomgång och fuktfördelning i byggnadsmaterial. (VVS (svensk) 5/1948).
- [25] KRISCHER, O., WISSMANN, W., KAST, W.: Feuchtigkeitseinwirkungen auf Baustoffe aus der umgebenden Luft. (Ges.-Ing., 5/1958).
- [26] KRISCHER, O. & MAHLER, K.: Über die Bestimmung des Diffusionswiderstandes und der kapillaren Flüssigkeitsleitzahl aus stationären und instationären Vorgängen. (VDI-Forschungsheft nr. 473).
- [27] KRISCHER, O.: Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. (Springer Verlag, 1963).
- [28] LUND-HANSEN, P.: Udtørring af porøse materialer. (Bygmästaren, Maj 1967).
- [29] LÜCK, W.: Feuchtigkeit. (Wien 1964).
- [30] LYKOW, A.W.: Transporterscheinungen in kapillarporösen Körpern. (Berlin 1958).
- [31] MORITZ, K.: Richtig und falsch im Wärmeschutz, Feuchtigkeitsschutz, Bautenschutz. (Bauverlag G.m.b.H. 1965).
- [32] McADAMS, W.H.: Heat Transmission. (McGraw-Hill Book Company. 1954).
- [33] NEUFERT, E.: Styropor-Handbuch. (Bauverlag G.m.b.H. 1963).
- [34] PENNER, E.: Suction and its use as a measure of moisture contents and potentials in porous materials. (Research paper no. 268, 1965, Canada).
- [35] PHILIP, I.R. & de VRIES, D.A.: Moisture Movement in porous Materials under Temperature Gradients. (Transactions, American Geophysical Union, Apr.1957).

- [36] ROSE, D.A.: Water movement in porous materials. (Brit. J.Appl.Phys. 1963, vol. 14, p. 256/262, 491/496).
- [37] SCHÄCKE, H.: Die Durchfeuchtung von Baustoffen und Bauteilen auf Grund des Diffusionsvorganges und ihre rechnerische Abschätzung. (Ges.-Ing. 74 (1953), p. 70/76, 167/172).
- [38] SEIFFERT, K.: Messungen von Diffusionswiderstandsfaktoren. (Kältetechnik 7/1960).
- [39] SEIFFERT, K.: Wasserdampfdiffusion im Bauwesen. (Bauverlag G.m.b.H., 1967).
- [40] SEREDA, P.I. & HUTCHEON, N.B.: Moisture Equilibrium and Migration in Building Materials. (Technical Paper no.205, Canada. 1965).
- [40A] SKLOVER, A.M., VASILEV, B.F., USKOV, F.V.: Osnovy stroitelnoj Teplotekniki. (Moskva 1956).
- [41] SOEIRO, F.: Contribution à l'étude du mouvement de l'humidité dans les milieux poreux isothermes. (Cahiers de la recherche, no.18, Paris 1964).
- [42] TVEIT, A.: Fukt og fukttransport i porøse materialer. (Norges Byggforskningsinstitutt, Rapport 39. Oslo, 1964).
- [43] TVEIT, A.: Measurements of moisture sorption and moisture permeability of porous materials. (Norwegian Building Research Institute, Oslo, 1966).
- [44] VOS, B.H. & van MINNEN: Distribution and transport of water in porous materials. (Report no.II-8/23 N 5, March 1965, TNO, Holland).
- [45] VOS, B.H. & van MINNEN: Moisture transport in porous materials. (Report no. II-11/23 N 5. May 1966, TNO, Holland).
- [46] VOS, B.H.: Condensation in Structures. (Report no. 23, p.14, March 1967, TNO, Holland).

- [47] WEXLER, A. & HASEGAWA: Relative Humidity-Temperature Relationship of Some Saturated Salt Solutions in the Temperature Range 0° to 50°C. (Journal of Research of the National Bureau of Standards. Vol.53, No. 1, July 1954).
- [48] Nogle foreløbige resultater vedrørende måling af fugttransport gennem byggematerialer. (Statens Byggeforskningsinstitut, Lyngby. 1. november 1965). (Ikke offentliggjort).
- [49] ASHRAE Guide and Data Book.

Oversigt over de vigtigste emner i
litteraturfortegnelsen

Fugt og fugtbevægelse i porøse materialer, generelt:

[5], [16], [20], [27], [30], [35], [36], [41],
[42], [44], [45].

Fugt i byggematerialer:

[3], [7A], [8], [10], [11], [21], [23], [24],
[28], [31], [37], [40], [40A], [46], [49].

Den almindelige diffusionsberegning:

[3], [9], [11], [12], [13], [14], [15], [31],
[33], [39].

Målinger af fugtegenskaber:

[5], [16], [17], [19], [21], [25], [26], [34],
[38], [41], [43], [48].

